



David Miguel Cavaco Henriques

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Alocação adaptativa de tolerâncias com vista a ajustar o nível sigma da produção de sistemas mecânicos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT/UNL

Co-orientador: Prof. Doutor José Fernando Gomes Requeijo,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor António Gabriel Marques Duarte dos Santos

Vogais: Prof. Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos

Prof. Doutor António José Freire Mourão



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2015

David Miguel Cavaco Henriques

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**Alocação adaptativa de tolerâncias com
vista a ajustar o nível sigma da
produção de sistemas mecânicos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor António José Freire Mourão,
Professor Associado, FCT/UNL

Co-orientador: Doutor José Fernando Gomes Requeijo,
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Setembro, 2015

ALOCACÃO ADAPTATIVA DE TOLERÂNCIAS COM VISTA A AJUSTAR O NÍVEL SIGMA DA PRODUÇÃO DE SISTEMAS MECÂNICOS

NOTA: Esta dissertação não foi escrita ao abrigo do novo acordo ortográfico de 1990.

Copyright © David Miguel Cavaco Henriques, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais.

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu mais sincero agradecimento ao meu orientador, o Professor Doutor António Mourão, pela disponibilidade, pelo apoio e pelo incentivo que se mostraram fundamentais para a consecução desta dissertação. Agradeço a oportunidade de participar no artigo científico apresentado na ICAD 2014, pois foi uma experiência bastante enriquecedora. Por fim, gostaria de agradecer todos os conselhos e a partilha de conhecimentos sobre diversos temas da vida profissional de um engenheiro, que acredito terem contribuído para o meu crescimento enquanto pessoa e futuro profissional.

Ao Professor Doutor José Gomes Requeijo pela sua contribuição, disponibilidade e por o seu envolvimento nesta dissertação. O seu apoio na aquisição de conhecimentos sobre gestão da qualidade e na orientação do trabalho associado à capacidade dos processos foram fundamentais para alcançar o resultado obtido.

Não poderia não deixar uma palavra de agradecimento ao Professor Doutor António Gonçalves-Coelho pela colaboração preciosa na incorporação da teoria axiomática de projecto na metodologia.

Ao corpo docente da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa pela formação ministrada e pelos recursos disponibilizados, que me deram um conjunto de competências de grande valia.

A todos os colegas de curso com quem tive oportunidade de trabalhar, em especial ao Guilherme Viegas, ao André Monteiro, ao Nuno Tomás, ao Rui Pereira, ao Rui Martins e ao Tiago Marques, aos quais não posso deixar de manifestar a minha consideração e amizade.

Aos meus pais que fizeram tudo ao seu alcance para me proporcionar uma formação superior, mas sobretudo pela educação, princípios, apoio, humildade e carinho que me transmitiram e pela paciência que os caracterizou nesta última fase da minha formação. À minha irmã pelo apoio, amizade, carinho, e por ter estado sempre presente.

Por último, gostaria de agradecer à minha namorada, Carina Almeida, que foi incansável nos incentivos, nas palavras de ânimo e que deu o maior apoio possível ao longo do meu percurso académico.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

Resumo

Actualmente, as empresas responsáveis por produções em massa incorporam frequentemente conceitos de gestão da qualidade associados à metodologia *Six-Sigma*. A caracterização de uma actividade através de um nível sigma permite o controlo e a optimização operacional, com o intuito de atingir níveis organizacionais elevados. A aptidão de um processo (*capability*) de fabrico relaciona a tolerância especificada e a variabilidade intrínseca do processo. Na produção de conjuntos mecânicos, em que os vários componentes são produzidos em instalações diferentes, o aumento do nível sigma global está sujeito à capacidade dos processos responsáveis pelo fabrico de cada componente. As estratégias com maior utilização focam-se numa redução da variabilidade do processo para atingir uma determinada capacidade do processo, e não ponderam qualquer modificação do projecto para atingir o mesmo objectivo.

Nesta dissertação apresenta-se uma metodologia de alocação adaptativa de tolerâncias dimensionais através de dados do controlo estatístico dos processos de fabrico. A metodologia apresentada visa a obtenção do conjunto de tolerâncias que permite atingir o nível sigma máximo disponível durante a produção, através do nivelamento das capacidades dos processos e minimização do conteúdo de informação – segundo o conceito da Teoria Axiomática de Projecto –, sem quaisquer intervenções sobre os processos de fabrico. A utilização de dados recolhidos pelo controlo estatístico dos processos permite adequar as tolerâncias especificadas a eventuais alterações nos processos de fabrico, desde que haja o conhecimento da cadeia de tolerâncias do sistema mecânico. Aplicou-se a metodologia a um caso, com o qual se demonstrou que é possível aumentar o nível sigma da montagem de um sistema mecânico através da alteração dinâmica das tolerâncias dos seus componentes sem interferir nos sistemas de produção.

Palavras-chave: síntese de tolerâncias, aptidão de processos, projecto mecânico, controlo estatístico do processo, *Six-Sigma*, Teoria Axiomática de Projecto.

Abstract

Nowadays, companies that mass produce often incorporate quality management concepts associated with Six-Sigma methodology. The characterization of an activity through a sigma level allows control and operational optimization, in order to achieve high organizational levels. The capability of a manufacturing process relates a specified tolerance and the intrinsic variability of the process. In the production of mechanical assemblies, in which the various components are manufactured in different facilities, an increase of the overall sigma level is subject to the capabilities of the processes responsible for the manufacture of each component. The strategies with wider usage focus on a reduction of the process variability to achieve a certain capability of the process, and they do not consider any design change to achieve the same objective.

This thesis presents a dynamic-design methodology of dimensional tolerances through statistical process control data of manufacturing processes. The methodology presented aims to obtain the set of tolerances that achieves the maximum sigma level available during production, by leveling the capabilities of processes and minimize the information content – according to the concept of Axiomatic Design Theory –, without any intervention on the manufacturing processes. Using data collected by statistical process control lets adjust the specified tolerances according to any changes in manufacturing processes. The methodology was applied to a general case resulting in a better solution than the solution described by traditional methods.

Keywords: tolerance synthesis, process capability, mechanical design, statistical process control, six-sigma, Axiomatic Design Theory

Índice de matérias

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice de matérias	xi
Índice de figuras	xv
Índice de tabelas	xvii
Lista de símbolos e abreviaturas.....	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação e objectivos	1
1.2 Estrutura da dissertação	3
2 Noções sobre capacidade do processo.....	7
2.1 Introdução	7
2.2 Noção de processo	7
2.3 Controlo estatístico do processo.....	8
2.4 Capacidade do processo	11
2.4.1 Conceito de capacidade do processo	11
2.4.2 Recolha e selecção de dados	11
2.4.3 Estudo da capacidade do processo	12
2.4.4 Índices de capacidade do processo	14
2.4.4.1 Índice de capacidade potencial do processo - C_p	15
2.4.4.2 Índice de capacidade de Taguchi - C_{pm}	16
2.4.4.3 Índice de capacidade efectiva - C_{pk}	17
2.4.4.4 Índice de capacidade em relação ao valor alvo - C_{pmk}	18
2.4.4.5 Outros índices de capacidade do processo.....	19
2.4.4.6 Normalidade e os índices de capacidade do processo	20
2.4.4.7 Análise dos índices de capacidade do processo.....	20
2.4.5 Bases de dados da capacidade do processo	21
2.5 Metodologia 6-Sigma	22
2.6 Custo da perda de qualidade	23

3	Projecto de tolerâncias dimensionais	25
3.1	Introdução.....	25
3.2	Revisão da literatura.....	25
3.3	Generalidades	28
3.3.1	Tolerâncias dimensionais.....	28
3.3.2	Análise funcional de sistemas mecânicos	29
3.3.3	Relações custo-tolerância	29
3.3.4	Problemas de análise e de síntese de tolerâncias	31
3.4	Síntese de tolerâncias	32
3.4.1	Modelo da intermutabilidade total.....	33
3.4.2	Modelo estatístico simples.....	34
3.4.3	Método de síntese por tolerâncias iguais	37
3.4.4	Método proporcional	37
3.4.5	Método da precisão constante.....	38
3.4.6	Métodos que utilizam técnicas de optimização	39
3.4.6.1	Métodos de síntese baseados na perda de qualidade.....	40
3.5	Melhoria da qualidade por intermédio de técnicas de toleranciamento	42
4	Fundamentos da Teoria Axiomática de Projecto.....	43
4.1	Introdução.....	43
4.2	Os domínios de projecto.....	43
4.3	Axiomas	45
4.3.1	Axioma da independência.....	45
4.3.2	Axioma da informação	46
4.4	A Teoria Axiomática de Projecto na gestão da qualidade	47
5	Metodologia de alocação adaptativa de tolerâncias com vista a ajustar o nível sigma da produção de sistemas mecânicos	51
5.1	Introdução.....	51
5.2	Propósito da metodologia.....	51
5.3	Considerações à aplicação da metodologia	53
5.4	Metodologia de projecto dinâmico de tolerâncias através de dados do SPC	54
5.5	Aplicação de apoio à metodologia	57

6	Aplicação da metodologia na produção em série de um conjunto mecânico	59
6.1	Caracterização do problema.....	59
6.2	Definição de tolerâncias por um procedimento tradicional.....	60
6.3	Utilização da metodologia proposta.....	62
7	Conclusão	65
	Bibliografia	67
Anexo A	Noções sobre estatística.....	73
	Conceitos básicos sobre estatística	73
	Média e variância	73
	Histogramas.....	73
	Algumas distribuições contínuas importantes	74
	Distribuição rectangular ou uniforme.....	74
	Distribuição Normal ou Gaussiana	75
	Distribuição Normal padronizada	76
Anexo B	Modelos estatísticos de processos	79
Anexo C	Código da aplicação em linguagem Matlab®	83

Índice de figuras

Figura 1.1 – Encadeamento entre o projecto e a produção no ciclo produtivo.	1
Figura 1.2 – Integração do projecto dinâmico de tolerâncias dimensionais no encadeamento entre o projecto e a produção, no ciclo produtivo.	3
Figura 1.3 - Fluxograma base da metodologia proposta articulado com a estrutura da dissertação.	4
Figura 2.1 - Representação esquemática de um processo	8
Figura 2.2 - Limites naturais da tolerância do processo	9
Figura 2.3 – Efeito da presença de causas comuns e especiais de variação no processo.	10
Figura 2.4 – Justificação para uma capacidade do processo reduzida.	13
Figura 2.5 – O estudo da capacidade do processo integrado no ciclo produtivo.	14
Figura 2.6 – Relação gráfica entre diferentes valores de C_p e C_{pk}	18
Figura 2.7 – Interpretação gráfica da metodologia 6-Sigma.	22
Figura 2.8 - Perda de qualidade vs desvio relativamente ao valor alvo (m).	24
Figura 3.1 – Relação gráfica entre cotas nominal, mínima e máxima.	28
Figura 3.2 – Relação entre custo de produção e tolerância atribuída.	30
Figura 3.3 – Ilustração dos conceitos de análise e de síntese de tolerâncias.	32
Figura 3.4 – Combinação das variações das dimensões dos componentes de acordo com os modelos da intermutabilidade total e estatístico simples.	36
Figura 3.5 – Representação gráfica do custo total como soma do custo de fabrico e do custo da perda da qualidade.	41
Figura 4.1 - O processo de mapeamento entre os domínios de projecto.	44
Figura 4.2 – Relação gráfica entre a f.d.p. do sistema e o intervalo admissível de funcionamento.	46
Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia proposta.	55
Figura 5.2 - Fluxograma da aplicação auxiliar.	58
Figura 6.1 - Conjunto funcional em estudo.	59

Figura A.1 - Função densidade de probabilidade contínua uniforme.....	74
Figura A.2 – Função de densidade de probabilidade Normal.	75
Figura B.1 – Modelo de processo A.....	79
Figura B.2 – Modelo de processo A1.....	80
Figura B.3 – Modelo de processo B.....	81
Figura B.4 – Modelo de processo C.....	81

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Exemplos de índices alternativos de capacidade do processo.....	19
Tabela 5.1 - Etapas de aplicação da metodologia e integração no projecto e produção.	54
Tabela 6.1 – Valores das cotas funcionais.	59
Tabela 6.2 – Tolerâncias (qualidade IT) e tolerância da folga (t_f) obtida por cada conjunto de tolerâncias.	60
Tabela 6.3 - Cotas nominais e tolerâncias inicialmente especificadas pelo projecto.....	60
Tabela 6.4 – Dados provenientes do controlo da qualidade de cada processo de fabrico.....	61
Tabela 6.5 – Probabilidade não-conforme e DPMO de cada processo de fabrico.	61
Tabela 6.6 - Cotas nominais e tolerâncias (Caso inicial após intervenção)	63
Tabela 6.7 – Índices de capacidade, DPMO e nível sigma (Caso inicial após intervenção).....	63

Lista de símbolos e abreviaturas

Lista de símbolos

Símbolo	Designação
C_p	Índice de capacidade potencial
\hat{C}_p	Estimativa do índice de capacidade potencial
C_{pm}	Índice de capacidade de Taguchi
C_{pmk}	Índice de capacidade em relação ao valor alvo
C_{pk}	Índice de capacidade efectiva
\hat{C}_{pk}	Estimativa do índice de capacidade efectiva
C_n	Cota nominal
C_{min}	Cota mínima
$C_{máx}$	Cota máxima
f	Folga
I	Conteúdo de informação para um projecto
I_t	Conteúdo de informação total de um projecto desacoplado com n RFs
m	Número de elementos funcionais com tolerâncias fixas na cadeia de cotas
N	Tamanho da amostra
n	Número de elementos funcionais na cadeia de cotas
nd	Tolerância determinável
np	Tolerância pré-determinada
p	Probabilidade de um RF ser satisfeito por um PP
p_f	Probabilidade de ocorrência de não-conformidades
p_{f_Total}	Probabilidade de ocorrência de conjuntos não-conformes
s	Desvio padrão da amostra
T	Valor nominal da característica da qualidade
T_{conj}	Tolerância de conjunto
t_f	Tolerância da folga
t_i	Tolerância do i -ésimo elemento funcional na cadeia de cotas
t_0	Tolerância inicialmente atribuída aos elementos funcionais

Lista de símbolos gregos

Símbolo	Designação
μ	Valor médio do processo
$\hat{\mu}$	Estimativa da média do processo
σ	Desvio padrão do processo
$\hat{\sigma}$	Estimativa do desvio padrão do processo
σ^2	Variância do processo
ς	Nível sigma

Lista de abreviaturas

Acrónimo	Designação
CS	Constrangimentos
CT	Custo total
DPMO	Defeitos por milhão de oportunidades
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
LIE	Limite inferior da especificação
LNIT	Limite natural inferior da tolerância do processo
LNST	Limite natural superior da tolerância do processo
LSE	Limite superior da especificação
NC	Necessidades do cliente
PP	Parâmetros de projecto
RF	Requisito funcional
RSS	Modelo estatístico simples (<i>Root Sum of the Squares Model</i>)
SPC	Controlo estatístico do processo (<i>Statistical Process Control</i>)
TAP	Teoria Axiomática de Projecto
VP	Variáveis de processo
WCM	Modelo da intermutabilidade total (<i>Worst-Case Model</i>)

1 Introdução

1.1 Motivação e objectivos

A motivação para esta dissertação surgiu no âmbito da disciplina de Toleranciamento de Sistemas Mecânicos, na qual se apontou a falta de comunicação efectiva e de parceria entre o projecto e a produção como um factor limitador de uma síntese de tolerâncias racional, que deve valer-se da capacidade¹ dos processos para ponderar o esforço exigido a cada processo.

A necessidade de especificação de tolerâncias dimensionais resulta da constatação que os processos de fabrico apresentam variabilidade que se reflecte na variação das dimensões das peças fabricadas. A ideia de que é inexequível produzir peças com dimensões exactas é particularmente importante no projecto de conjuntos mecânicos e introduz a necessidade do conceito de tolerância dimensional para garantir a funcionalidade do conjunto.

O engenheiro de projecto não consegue controlar o comportamento dos processos, portanto deve limitar a variação das dimensões das peças produzidas através das tolerâncias especificadas no projecto. Este procedimento é levado a cabo numa fase anterior à produção, como se mostra na Figura 1.1.

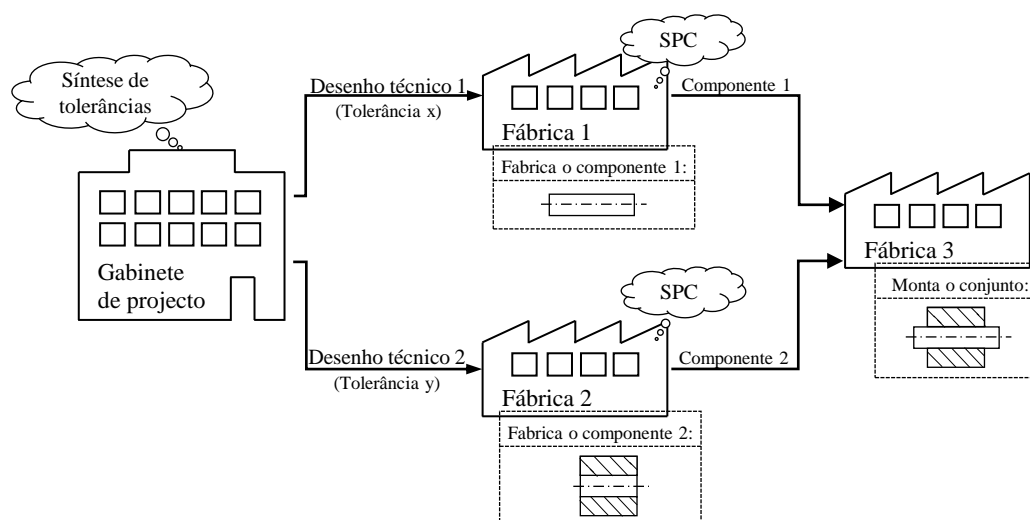


Figura 1.1 – Encadeamento entre o projecto e a produção no ciclo produtivo.

¹ Na literatura inglesa: *capability*. Ao longo desta dissertação utiliza-se o termo capacidade para expressar a aptidão de um processo para cumprir com sucesso a especificação. O termo capacidade deve ser entendido com o significado do termo anglo-saxónico *capability* e não como a acepção da palavra *capacity*. Adoptou-se esta tradução por ser a utilizada pela literatura da especialidade na língua portuguesa.

A atribuição de tolerâncias é fundamentada, frequentemente, com a experiência própria ou compilada em manuais, pois o projectista não dispõe de informação actualizada ou fiável sobre as capacidades dos processos a empregar. A definição de tolerâncias nestas circunstâncias induz vulnerabilidade dado que as tolerâncias especificadas no projecto podem provocar dificuldades dispensáveis a um processo, sem conhecimento do gabinete de projecto ou das outras unidades de fabrico. Em última análise, esta postura conduz a maiores esforços na produção para produzir dentro das especificações de projecto, e portanto, a custos de produção superiores.

A gestão da qualidade recorre ao controlo estatístico do processo (SPC – *Statistical Process Control* na literatura anglo-saxónica) fundamentalmente para assegurar que o processo de fabrico se adequa da melhor forma às tolerâncias que se pretendem. A sua aplicação em cada processo visa melhorar a qualidade de apenas um dos componentes, e qualquer aumento da capacidade de um processo não será percebido pelas restantes instalações nem pelo processo, como se ilustra na Figura 1.1.

Atendendo ao exposto, pretende-se com o trabalho desenvolvido nesta dissertação responder à seguinte questão: *Como pode o projecto auxiliar a gestão da qualidade na consecução de capacidades superiores dos processos, durante a produção?*

Uma resposta a esta questão deve conjugar conhecimentos de projecto e da gestão da qualidade dos processos. Nesta dissertação desenvolve-se uma metodologia de projecto dinâmico de tolerâncias sensível às capacidades dos processos e, que promove a realocação de tolerâncias durante a fase de produção de forma a garantir a equidade dos esforços exigidos aos processos de fabrico, em produções em série. A metodologia sugere que o departamento de projecto mantenha um conhecimento contínuo das capacidades dos processos de fabrico utilizados nas diferentes instalações, como se ilustra na Figura 1.2, para que se realize atempadamente e quando necessário, uma alteração das tolerâncias inicialmente especificadas em projecto.

Com base no enquadramento anteriormente apresentado definem-se como objectivos da dissertação:

- Desenvolver o método de alocação adaptativa de tolerâncias, o que permite um projecto dinâmico;
- Criar uma aplicação informática que contribua para a automatização do método.

Estes objectivos pressupõem:

- Análise das técnicas utilizadas pela gestão da qualidade para determinar e apresentar a capacidade dos processos;

- Recolha e análise dos índices de capacidade dos processos propostos na literatura;
- Aplicação de métodos de projecto de tolerâncias dimensionais que utilizem a capacidade dos processos de fabrico para a síntese de tolerâncias;
- Aplicação dos conceitos da Teoria Axiomática de projecto com vista à obtenção das soluções mais adequadas.

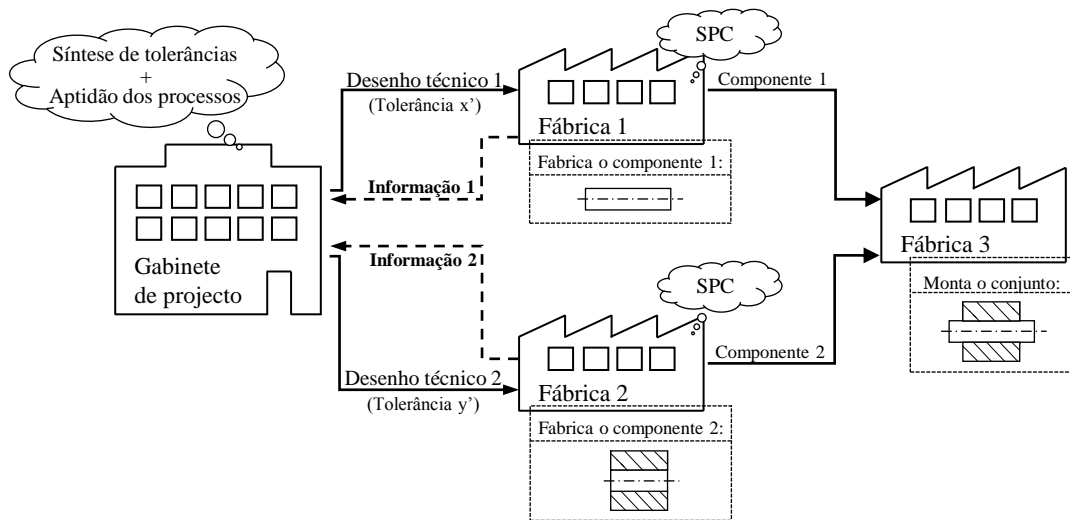


Figura 1.2 – Integração do projecto dinâmico de tolerâncias dimensionais no encadeamento entre o projecto e a produção, no ciclo produtivo.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em sete capítulos e três anexos. Os capítulos iniciais apresentam uma exposição teórica, enquanto os restantes se debruçam sobre a apresentação e a explicitação da metodologia.

O presente capítulo compõe a introdução, onde se elucida o motivo que determinou a abordagem do tema em estudo e no qual se expõem os objectivos a alcançar. Neste capítulo descreve-se ainda a estrutura da dissertação.

Na Figura 1.3 apresenta-se o fluxograma base da metodologia proposta e a distribuição dos seus conteúdos na estrutura da dissertação. A utilização da metodologia pressupõe o domínio de três matérias distintas, a saber: Controlo estatístico dos processos; Toleranciamento de sistemas mecânicos; Teoria axiomática de projecto. Desta forma, os primeiros três capítulos, após o presente capítulo, propõem-se a explicitar as matérias utilizadas como suporte da metodologia proposta, e nos quais se apresentam os resultados da revisão da literatura considerados relevantes.

O capítulo 2 incorpora um conjunto de noções relativas ao controlo estatístico dos processos. Este capítulo introduz a necessidade do estudo da capacidade dos processos, apresenta os índices de capacidade com maior exposição na literatura e utilização na indústria e faz uma breve introdução da metodologia *6-Sigma*. Os conteúdos expostos neste capítulo visam fundamentar a necessidade de uma metodologia como a que se propõe. Como se expõe no capítulo, o desconhecimento da análise funcional do conjunto mecânico justifica que a consecução de determinado nível sigma do processo seja apenas possível através da melhoria do sistema produtivo, como se indica na Figura 1.3.

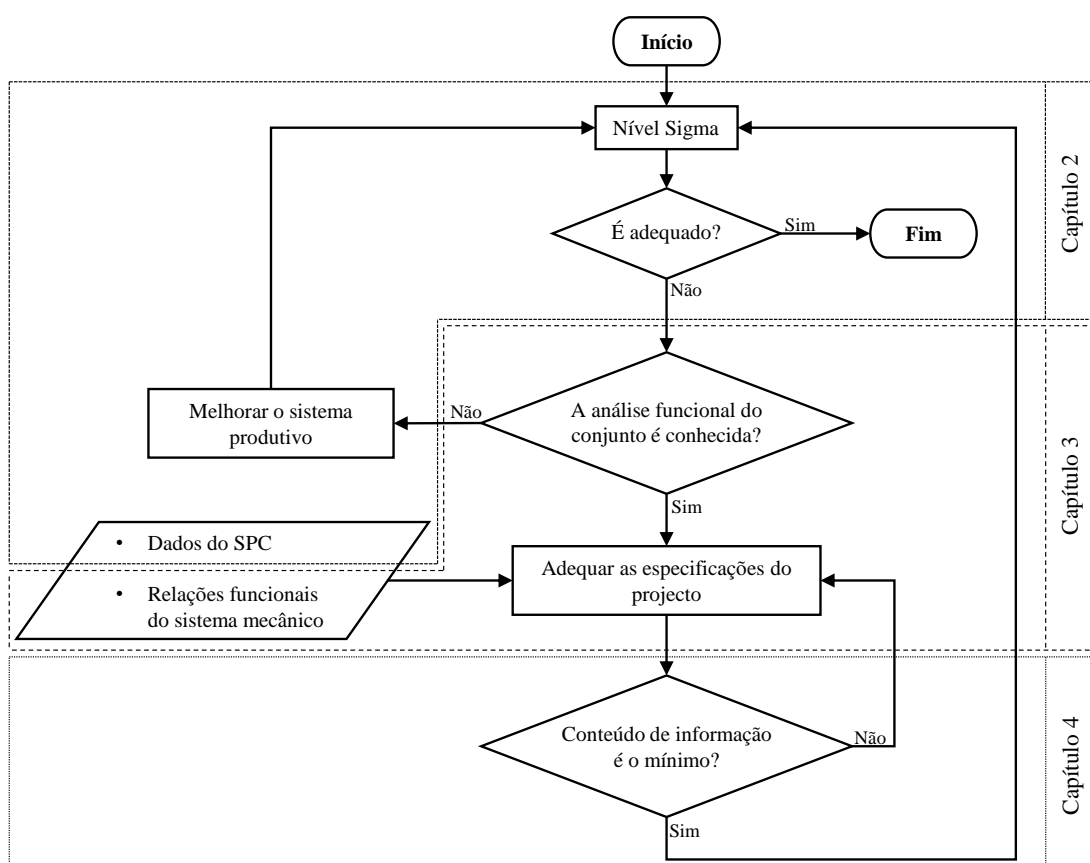


Figura 1.3 - Fluxograma base da metodologia proposta articulado com a estrutura da dissertação.

No capítulo 3 introduzem-se alguns fundamentos para a análise funcional de conjuntos mecânicos, os métodos tradicionais de síntese de tolerâncias e apresenta-se uma revisão de alguns trabalhos publicados na área da síntese de tolerâncias, que incorporam a utilização de dados da capacidade do processo como restrição à síntese de tolerâncias.

O capítulo 4 introduz de forma sucinta a teoria axiomática de projecto, os seus axiomas e a sua aplicação na gestão da qualidade dos processos.

Depois de uma exposição das matérias que suportam a metodologia, é no capítulo 5 que se apresenta e desenvolve a metodologia de projecto dinâmico de tolerâncias dimensionais

através de dados do controlo estatístico dos processos de fabrico. Neste capítulo desenvolve-se com maior detalhe a base da metodologia proposta (ver Figura 1.3).

Finalmente, no capítulo 6 recorre-se a um caso para fazer a aplicação da metodologia desenvolvida e, por fim, apresentam-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia.

O último capítulo, o capítulo 7, reúne as principais conclusões, e aponta linhas de desenvolvimento desta dissertação.

2 Noções sobre capacidade do processo

2.1 Introdução

A necessidade de inspecção das dimensões das peças produzidas surge, quase em simultâneo, com as primeiras produções em série de conjuntos mecânicos e decorre da constatação de uma variação indesejada das dimensões produzidas, a qual pode justificar que as peças não dêem montagem ou que a intermutabilidade de peças não seja assegurada pelo que existe um decréscimo do rendimento da produção. Até ao presente, tem-se colocado grande ênfase no desenvolvimento de técnicas e metodologias, suportadas por teorias científicas, de forma a se conseguir uma melhoria da qualidade dos processos. A procura contínua da melhoria da qualidade serve-se de dois grandes tipos de técnicas e metodologias: as de gestão e as estatísticas, que conduzem na prática não só ao aumento da produtividade, como também à redução de custos [1].

A metodologia proposta nesta dissertação recorre a conceitos e resultados da aplicação do controlo estatístico do processo (SPC), como se observou na Figura 1.3. Este é um dos diversos métodos estatísticos com possibilidade de utilização na concepção, desenvolvimento, controlo e melhoria contínua da qualidade de produtos e processos e, que desde há dezenas de anos, tem desempenhado um papel extremamente importante na consecução da melhoria contínua e no controlo da qualidade dos processos.

No presente capítulo aborda-se um conjunto de noções relativas ao SPC, explicam-se os princípios do estudo da capacidade dos processos, apresentam-se os índices de capacidade com maior utilização na indústria e faz-se uma breve introdução à metodologia *6-Sigma*.

2.2 Noção de processo

Define-se um processo como um conjunto de actividades interrelacionadas que transforma certas entradas em determinadas saídas (ver Figura 2.1). Embora a noção de processo seja mais abrangente para a gestão da qualidade, no desenvolver desta dissertação a utilização do termo “processo” deve ser entendido como processo de fabrico. Nos processos de fabrico, as entradas dos processos (*process inputs* na literatura inglesa) podem ser variáveis controláveis (velocidades de alimentação, temperaturas, pressões, entre outros) ou variáveis não controláveis (condições ambientais ou matéria-prima de grande variabilidade). As saídas dos

processos (*process outputs* na terminologia inglesa) correspondem aos produtos, cujas características da qualidade relevantes devem satisfazer plenamente o cliente interno ou externo à organização [2].

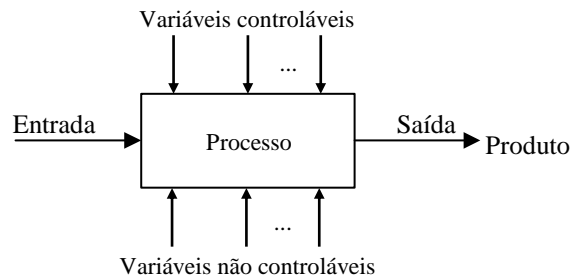


Figura 2.1 - Representação esquemática de um processo [1].

A variabilidade é uma característica intrínseca a qualquer processo de fabrico, que pode ser explicada pela exposição dos processos de fabrico a diversas fontes de variação, nomeadamente: equipamento; matéria-prima; mão-de-obra; meio ambiente; métodos; metrologia. A exposição do processo a fontes de variação impede que, conscientemente se possa associar um valor constante a uma determinada dimensão produzida. Consequentemente, uma melhoria da qualidade dos processos e dos produtos deve passar pela redução das fontes de variação e dos seus efeitos.

2.3 Controlo estatístico do processo

A utilização de métodos estatísticos como ferramenta de avaliação da qualidade dos processos é actualmente um padrão, e um requisito presente em diversas normas e directrizes de associações e empresas responsáveis por grandes produções, o que justifica que a estatística seja utilizada como linguagem universal, quer ao nível interno de uma organização quer ao nível externo.

O controlo estatístico do processo é uma técnica estatística com aplicação no planeamento, controlo e melhoria contínua da qualidade dos processos. O SPC é utilizado pela gestão da qualidade com a finalidade de garantir a satisfação do cliente. A aplicação do conjunto de ferramentas propostas pelo controlo estatístico do processo na produção visa a monitorização do comportamento do processo, a redução sistemática da variabilidade nas características da qualidade de interesse e avaliar se o processo consegue manter uma produção consistentemente dentro das especificações. O recurso ao SPC apresenta-se como de grande interesse, sobretudo em grandes produções, pois são aquelas em que é possível adquirir maior quantidade de dados que caracterizem os processos, o que permite um tratamento estatístico dos dados [2].

A identificação, a redução ou a eliminação das causas da variação do processo são fundamentais na gestão da qualidade dos processos. As causas de variação do processo podem ser causas comuns ou causas especiais, também chamadas causas assinaláveis de variação [1]. As causas comuns são as fontes de variação características de processos sob controlo estatístico. Actuam repetidamente no processo e, no seu conjunto, são a causa da variabilidade inerente ou natural do processo. Um processo estável está apenas sujeito a causas comuns de variação. As causas especiais são fontes de variação com comportamento errático e, geralmente, de intensidade superior às causas comuns. As causas especiais não são incluídas na distribuição seguida por uma característica, quando o processo está sob controlo estatístico. A capacidade do processo é negativamente afectada pela presença deste tipo de fontes de variação. Um processo afectado por causas especiais de variação diz-se fora de controlo estatístico.

No §Anexo A apresentam-se alguns conceitos estatísticos importantes e as propriedades de alguns tipos de distribuição de grande utilidade na gestão da qualidade, nomeadamente, a distribuição Normal ou Gaussiana, uma das distribuições com maior utilização. A Figura 2.2 mostra um processo no qual a característica da qualidade produzida tem uma distribuição Normal com valor médio (μ) e desvio padrão (σ). A probabilidade de um processo modelado por uma distribuição Normal produzir dentro dos seus limites naturais é igual a 99,73%.

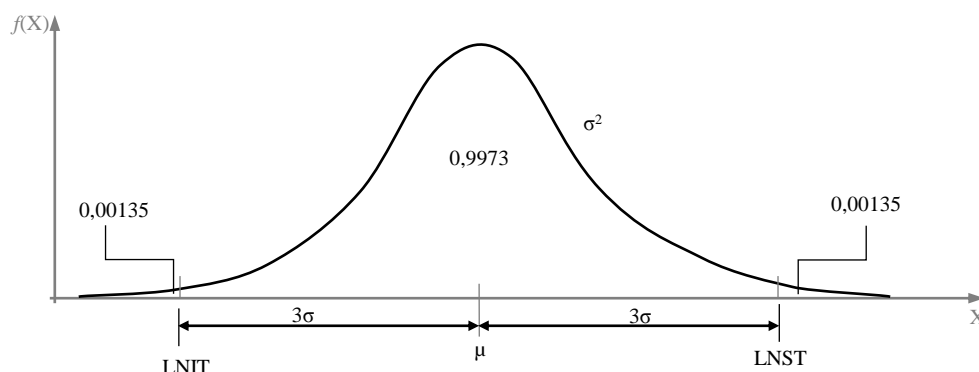


Figura 2.2 - Limites naturais da tolerância do processo [2].

Os limites naturais superior e inferior da tolerância do processo são matematicamente apresentados na forma,

$$\text{LNST} = \mu + 3\sigma \quad (2.1)$$

$$\text{LNIT} = \mu - 3\sigma \quad (2.2)$$

Na Figura 2.3 ilustra-se os efeitos das causas comuns e especiais de variação do processo, para uma característica da qualidade X . Até ao instante de tempo t_1 , o processo representado encontra-se sob controlo estatístico, ou seja, está apenas sujeito a causas comuns de variação. Neste instante, a generalidade da produção insere-se dentro do intervalo da especificação, estremado pelo limite inferior (LIE) e pelo limite superior da especificação

(LSE). Processos modelados por uma distribuição Normal podem ainda caracterizar-se pelo valor médio μ_0 e desvio padrão σ_0 .

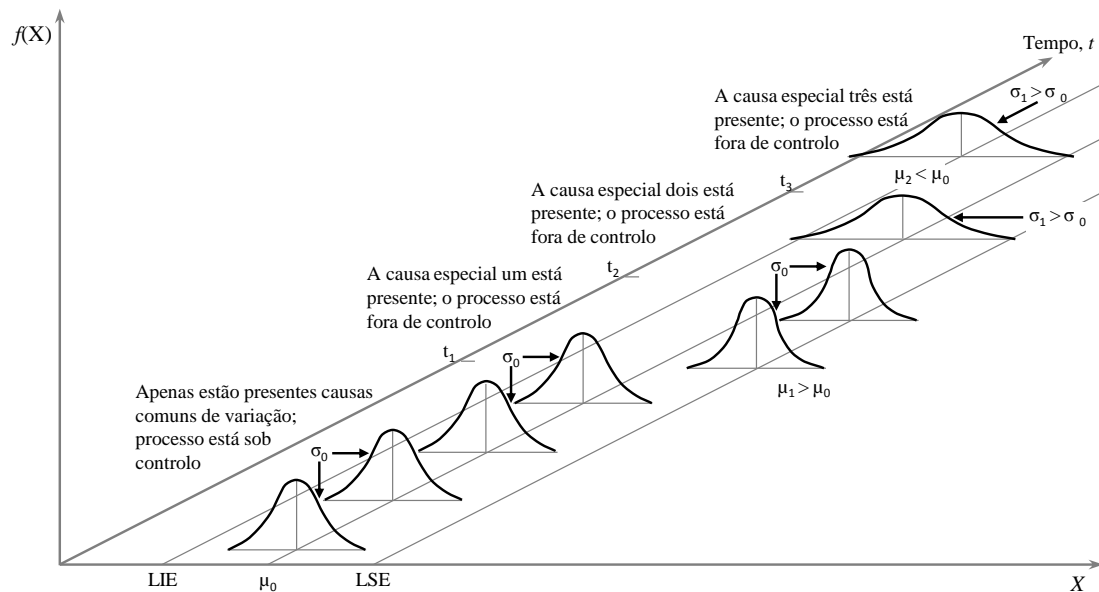


Figura 2.3 – Efeito da presença de causas comuns e especiais de variação no processo, adaptado de [2].

Entre os instantes de tempo t_1 e t_3 , o processo está sujeito a causas especiais de variação. As consequências da presença de causas especiais de variação podem surgir de três formas:

- Um desvio do valor médio do processo ($\mu_2 < \mu_0 < \mu_1$), como se pode verificar entre o instante t_1 e t_2 ;
- Um aumento do valor do desvio padrão do processo ($\sigma_0 < \sigma_1$), como se pode verificar entre o instante t_2 e t_3 ;
- Uma associação das duas, que na figura se representa após o instante t_3 .

A aplicação dos procedimentos e fórmulas associadas ao controlo estatístico do processo pressupõe que os processos estejam sob controlo estatístico, ou seja, os processos sejam estáveis e estacionários, portanto, devem encontrar-se apenas sujeitos a causas comuns de variação. Esta verificação deve fazer-se recorrendo a cartas de controlo. A aquisição de dados da produção deve ser feita por amostragem [3].

Uma avaliação completa e correcta do processo está dependente de um modelo, obtido através de métodos estatísticos, que descreva com precisão o processo. Quanto melhor for o ajustamento do modelo ao processo, maior será a precisão dos dados obtidos [4].

A obtenção de um modelo que caracterize adequadamente o processo está dependente da medição das peças produzidas pelo processo. Os dados das medições indicam o desempenho do processo. A utilização de métodos estatísticos permite que, a partir destes dados, se formule um modelo matemático que descreva com precisão o processo. Um dos problemas que se coloca

é a precisão com que o modelo se adequa ao processo. No §Anexo B apresentam-se os modelos de processos mais utilizados e os fundamentos para a sua obtenção.

A variabilidade das características críticas para a qualidade no processo, é uma medida da uniformidade da produção. Segundo [2] esta variabilidade pode ser expressa de duas formas:

1. A variabilidade natural ou inerente de uma característica crítica para a qualidade, num período específico, corresponde à variabilidade “instantânea”.
2. A variabilidade natural ou inerente de uma característica crítica para a qualidade ao longo do tempo.

Na Figura B.1 e na Figura B.3 (ver §Anexo B) é possível verificar a diferença entre as variabilidades acima mencionadas. No modelo de processo ilustrado pela Figura B.1 podemos verificar que a variabilidade “instantânea” da característica crítica para a qualidade é igual à variabilidade natural da característica crítica para a qualidade ao longo do tempo. No modelo de processo ilustrado pela Figura B.3 a variabilidade natural da característica crítica para a qualidade ao longo do tempo engloba a acumulação de várias variabilidades “instantâneas”.

2.4 Capacidade do processo

2.4.1 Conceito de capacidade do processo

A capacidade do processo é a aptidão que o processo apresenta para produzir consistentemente dentro dos limites da especificação. A estabilidade do processo é um requisito fundamental para que se possa empregar o conceito de capacidade do processo. O seu estudo usa um método estatístico que, ao avaliar as saídas do processo, possibilita a análise da consistência deste em produzir artigos que satisfaçam determinada especificação técnica.

2.4.2 Recolha e selecção de dados

Um estudo da capacidade do processo não mede directamente o processo, mas sim, parâmetros funcionais ou características críticas para a qualidade no produto (*output* do processo). A recolha de dados referentes às características críticas para a qualidade do produto é de grande relevância, pois quando realizada incorrectamente pode induzir erros nas conclusões tiradas com a aplicação das cartas de controlo. É importante que factores como as unidades constituintes, a dimensão de uma amostra e a frequência de amostragem obedeçam a determinados requisitos [1].

Segundo Ryan [5], uma selecção cuidadosa dos dados utilizados para calcular os índices de capacidade é mais importante que a selecção do índice a utilizar. Os dados utilizados para computação de um índice de capacidade devem provir de um processo sob controlo estatístico, a amostra deve ser representativa da população, e ter dimensão suficiente para avaliar a extensão da não-Normalidade, e permitir ajustar uma distribuição não-Normal aos dados se uma abordagem fundamentada na Normalidade for insatisfatória.

É essencial garantir que os dados históricos utilizados para o estudo da capacidade foram recolhidos apenas quando o processo estava sob controlo estatístico. Caso o processo não se encontre sob controlo estatístico, durante a totalidade do período em que os dados foram recolhidos, a capacidade do processo será subestimada. A variância calculada neste caso será sempre superior à real.

A natureza estatística dos dados, aliada às limitações naturais dos instrumentos de medição, fundamenta a existência de erros associados, que não serão abordados nesta dissertação, mas que poderão constituir material de desenvolvimento da metodologia proposta.

2.4.3 Estudo da capacidade do processo

A obtenção de uma estimativa da capacidade do processo está dependente da realização de um estudo da capacidade. O estudo da capacidade do processo é um método estatístico usado para analisar a consistência de um processo em produzir de acordo com determinada especificação técnica e envolve a recolha dos dados, determinação da forma como estes serão recolhidos e selecção da forma de apresentação da capacidade do processo [5]. O resultado de uma estimativa da capacidade do processo pode ser apresentado de três formas:

1. Sob a forma de uma distribuição de probabilidade com uma forma específica, valor médio e desvio padrão, sem ponderar as especificações da característica da qualidade;
2. Como uma percentagem da produção fora das especificações;
3. Como um índice de capacidade (abordados em §2.4.4).

Quando se apresenta o resultado de uma estimativa da capacidade do processo através de uma distribuição de probabilidade com uma forma específica, os histogramas mostram-se ferramentas de grande utilidade, justificando a sua ampla utilização na gestão da qualidade. Uma das vantagens da sua utilização na estimativa da capacidade de um processo é a observação rápida do desempenho do processo. Outro motivo pelo qual se justifica a utilização de histogramas é que estes permitem visualizar, de uma forma imediata, o(s) motivo(s) da baixa capacidade do processo, em situações de fraco desempenho do processo. Contudo, e apesar das vantagens de utilização dos histogramas apresentadas, o controlo e estimação de variáveis do

processo, como a média e o desvio padrão, devem resultar sempre da utilização e análise de cartas de controlo pois, dentre outros factores, a sua aplicação permite compreender e separar a dispersão natural do processo da dispersão provocada pela presença de causas especiais. A Figura 2.4(a) ilustra um processo que, apesar de ter uma capacidade potencial adequada (variância reduzida), tem o seu valor alvo mal localizado, justificando assim a sua baixa capacidade. O processo ilustrado na Figura 2.4(b) apresenta variabilidade excessiva, o que resulta numa baixa capacidade do processo.

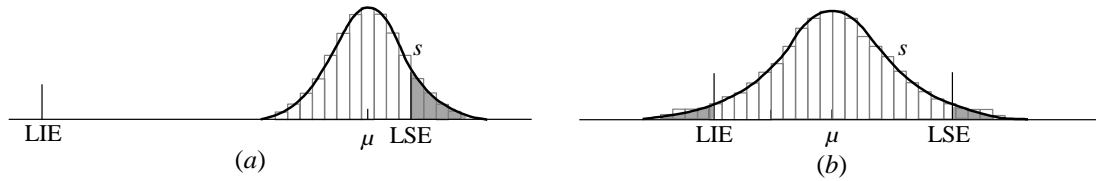


Figura 2.4 – Justificação para uma capacidade do processo reduzida.
(a) Processo não centrado; (b) Variabilidade excessiva do processo [2].

Como se referiu, o resultado de uma estimativa da capacidade do processo pode também ser apresentado sob a forma de uma percentagem da produção fora das especificações. Muitas vezes é mais prático apresentar a capacidade dos processos em termos de unidades não-conformes ou defeituosas, não-conformidades ou defeitos. Recorre-se frequentemente à medida defeitos por milhão de oportunidades (DPMO).

O número de DPMO pode ser obtido através da equação (2.3) ou da equação (2.4) [2].

$$\text{DPMO} = \frac{\text{Número total de defeitos}}{\text{Número de unidades} \times \text{Número de oportunidades}} \times 10^6 \quad (2.3)$$

$$\text{DPMO} = (p_f) \times 10^6 \quad (2.4)$$

onde p_f é a probabilidade de ocorrência de não-conformidades. A determinação desta probabilidade, representada a sombreado na Figura 2.4, é abordada com maior detalhe em §Noções sobre estatística. O número de oportunidades é o número potencial de possibilidades dentro de uma unidade produtiva para ocorrer um defeito. Obviamente, estas quantidades são estimadas através dos dados da amostra, logo são necessárias amostras maiores para obter estimativas confiáveis [2].

Recorrendo à probabilidade não-conforme de cada processo, p_f , pode obter-se a probabilidade de ocorrência de conjuntos não-conformes na montagem, p_{f_Total} , através da equação (2.5).

$$p_{f_Total} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_{f,i}) \quad (2.5)$$

A Figura 2.5 esquematiza alguns dos princípios gerais do estudo da capacidade do processo e fornece o seu enquadramento durante o período produtivo.

O estudo da capacidade do processo é de suma importância para o controlo da qualidade, como já se referiu anteriormente. A sua aplicação permite numa primeira fase avaliar a produção, avaliar as máquinas a utilizar e obter estimativas da capacidade do processo, antes da produção em série se iniciar. Por outro lado, possibilita a avaliação de todas as variáveis com influência no comportamento do processo e proceder à substituição, rectificação e ajustamento daquelas que se considerem necessárias. Durante a produção em massa, um estudo desta natureza permite avaliar a produção e apresenta-se como uma ferramenta fundamental para a melhoria contínua da qualidade.

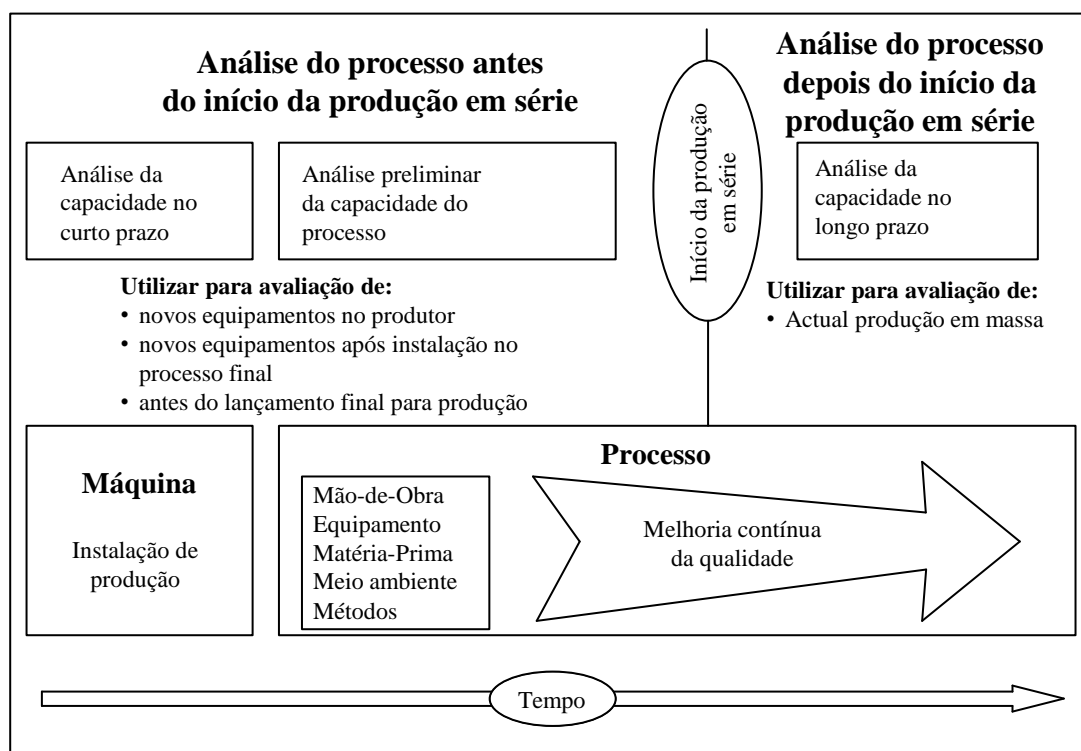


Figura 2.5 – O estudo da capacidade do processo integrado no ciclo produtivo, adaptado de [4].

2.4.4 Índices de capacidade do processo

Os índices de capacidade do processo são uma forma simples e frequentemente utilizada, de expressar quantitativamente a capacidade dos processos. A sua utilização é conveniente pois reduz informação complexa sobre o processo num único índice. Apesar das diversas aplicações dos índices de capacidade, a sua utilização incide sobretudo na monitorização do comportamento do processo relativamente aos requisitos especificados por clientes [6].

Os vários tipos de índices de capacidade do processo diferenciam-se pelo método de cálculo, pelas propriedades e pela aplicação pretendida. Contudo, o seu princípio de obtenção é sensivelmente o mesmo, pois na realidade, o rácio da precisão pretendida ou requerida e a precisão obtida pelo processo, é sempre observado.

A aplicação dos índices de capacidade pressupõe que o processo esteja sob controlo estatístico e que, geralmente, possa ser modelado por uma distribuição Normal. Estes pressupostos são essenciais para uma interpretação correcta dos índices de capacidade dos processos. A utilização de amostras provenientes de um processo que não está sob controlo estatístico conduz à perda da habilidade de previsão do desempenho do processo, devido ao uso de parâmetros instáveis, portanto deve ser evitada.

Podem considerar-se três gerações de índices de capacidade. A primeira é composta pelo índice C_p , a segunda pelos índices C_{pk} e C_{pm} , e a terceira pelo índice C_{pmk} . Dada a sua grande aplicação na indústria, os índices de capacidade C_p e C_{pk} são frequentemente intitulados como índices de capacidade básicos [1].

2.4.4.1 *Índice de capacidade potencial do processo - C_p*

O índice de capacidade C_p , usualmente designado por índice de capacidade potencial do processo, compara o intervalo de tolerância da especificação com o intervalo de tolerância natural do processo, assumindo que a saída do processo pode ser aproximada por uma distribuição Normal. É um indicador da aptidão do processo produzir dentro dos limites da especificação, para casos em que a especificação é bilateral e o processo é centrado [7]. O índice de capacidade C_p é dado pela equação (2.6).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (2.6)$$

onde LSE e LIE são o limite superior e inferior da especificação, respectivamente, e σ é o desvio padrão do processo.

Para processos a operar perfeitamente centrados, a percentagem espectável de produtos conformes é

$$p = 1 - 2\Phi(-3C_p) \quad (2.7)$$

onde Φ denota a função de distribuição acumulada (fda) de $N(0,1)$ [8].

Para garantir um bom desempenho, o valor de C_p deverá ser o mais alto possível, sem incorrer em custos desnecessários. O valor de C_p deverá ser sempre igual ou superior a 1,33 pois, dificilmente a média do processo irá coincidir com o ponto médio da especificação,

fazendo com que mesmo apresentando um C_p de 1,33, o processo possa não estar a produzir dentro das especificações, porque não é um processo centrado, como se ilustrou na Figura 2.4.

Alguns autores vêem o índice C_p como uma fraca medida da capacidade do processo, visto ignorar a localização do valor médio do processo, ou do valor médio pretendido, e que mede apenas a capacidade do processo potencial que se verificaria no caso do valor médio do processo estar centrado entre os limites da especificação [5].

Em aplicações práticas, verifica-se com frequência a substituição do valor médio (μ) do processo e do desvio padrão do processo (σ) pelas respectivas estimativas, $\hat{\mu}$ e $\hat{\sigma}$. Isto sucede pois os valores de μ e σ são por norma desconhecidos (ver §Anexo A).

Uma estimativa do índice de capacidade C_p é dada pela equação (2.8).

$$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}} \quad (2.8)$$

onde $\hat{\sigma}$ é o desvio padrão do processo [7].

O que se observa na prática é uma estimativa dos índices de capacidade, que está sujeita a um erro, uma vez que esta depende de estatísticas da amostra. Podem cometer erros graves na estimativa dos índices de capacidade do processo, a partir de dados da amostra, de tal forma que o índice de capacidade calculado pode não ser confiável. Considera-se então que é uma boa prática apresentar qualquer estimativa dos índices de capacidade em termos do intervalo de confiança. Pode-se encontrar informação mais aprofundada sobre a estimativa de índices de capacidade na bibliografia [7] [9].

2.4.4.2 Índice de capacidade de Taguchi - C_{pm}

O índice de capacidade do processo C_{pm} foi introduzido na literatura por Chan *et al.* [10], contudo a sua utilização já havia sido sugerida por Hsiang e Taguchi [11], apesar de não utilizarem o símbolo C_{pm} . Este índice adopta o mesmo princípio do índice C_p , contudo, considera no intervalo da tolerância natural do processo o desvio da média relativamente ao valor nominal, T, da característica da qualidade. Este índice é dado pela equação (2.9).

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (2.9)$$

Quando as tolerâncias não são simétricas relativamente ao valor nominal, T, os resultados obtidos com o índice de capacidade C_{pm} não são satisfatórios pois este índice não depende da relação entre μ e os limites da especificação [5].

Assim, embora o índice C_{pm} seja uma melhoria em relação ao índice C_p , este não reflecte o desempenho do processo relativo à característica do processo estar dentro da tolerância.

2.4.4.3 Índice de capacidade efectiva - C_{pk}

O índice de capacidade C_p é insensível à localização da média do processo relativamente às especificações. Esta insensibilidade deve-se a que o índice C_p apenas compara a amplitude referente às especificações com a amplitude natural do processo, dado por 6σ . Nas duas distribuições Normais no topo da Figura 2.6 é possível verificar que, apesar de ambos os processos terem um valor $C_p = 2,0$, o primeiro (a) apresenta uma capacidade superior ao processo (b) pois, o processo (b) não está a produzir no valor nominal das especificações. Deve ainda referir-se que, devido à sua natureza, a aplicação do índice C_p não é indicada nos casos em que é exigida uma especificação unilateral.

De forma a superar as limitações inerentes à utilização do índice C_p , surgiram outros índices de capacidade do processo, como os índices de segunda geração C_{pk} e C_{pm} [1].

Para especificações bilaterais, o índice de capacidade C_{pk} é definido pela equação (2.10).

$$C_{pk} = \min\{(C_{pk})_I, (C_{pk})_S\} \quad (2.10)$$

com

$$(C_{pk})_I = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (2.11)$$

$$(C_{pk})_S = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (2.12)$$

Deve notar-se que o índice de capacidade C_{pk} é simplesmente o índice de capacidade do processo unilateral para o limite da especificação mais próximo da média do processo. Quando a especificação é unilateral, o índice de capacidade do processo C_{pk} é definido pelas equações (2.11) ou (2.12), individualmente.

Recorrendo aos índices de capacidade C_p e C_{pk} pode-se obter a percentagem espectável de produtos conformes, por aplicação da equação (2.13) [9].

$$p = 1 - \Phi(-3(2C_p - C_{pk})) - \Phi(-3C_{pk}) \quad (2.13)$$

Para especificações bilaterais exige-se $C_{pk} \geq 1,33$ para o processo considerado capaz, enquanto que para especificações unilaterais a exigência é $C_{pk} \geq 1,25$. Para qualquer tipo de especificação pretende-se que o valor de C_{pk} seja o mais elevado possível [1].

A dimensão do C_{pk} relativamente ao C_p é uma medida directa de quão centrado o processo está a produzir. Geralmente, e de forma análoga a C_p , o processo considera-se capaz se $C_{pk} \geq 1,33$, e estará centrado no valor médio da especificação quando $(C_{pk})_I = (C_{pk})_S$ ou $C_p = C_{pk}$. Quando $C_{pk} < C_p$, o processo está descentrado.

A Figura 2.6(d) ilustra o caso em que a média do processo é exactamente igual a um dos limites da especificação, conduzindo a $C_{pk} = 0$. Como a Figura 2.6e ilustra, quando $C_{pk} < 0$ a média do processo encontra-se fora das especificações. Claramente, se $C_{pk} < -1$, o processo encontra-se inteiramente fora das especificações [2].

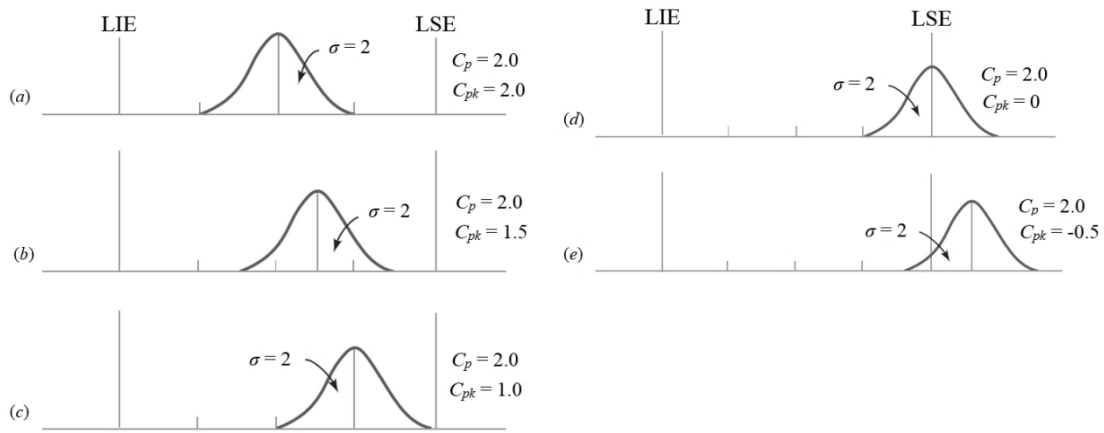


Figura 2.6 – Relação gráfica entre diferentes valores de C_p e C_{pk} [2].

Numa aplicação prática em que o desvio padrão e a média do processo não são conhecidos, estes serão substituídos por uma estimativa, de forma semelhante a C_p . A estimativa do índice de capacidade C_{pk} será dada pela equação (2.14) [2].

$$(\hat{C}_{pk}) = \min\left(\frac{\hat{\mu} - LIE}{3\hat{\sigma}}, \frac{LSE - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}\right) \quad (2.14)$$

Apesar da sua larga aplicação, algumas autoridades da engenharia da qualidade alertam para o uso rotineiro de índices de capacidade do processo, tais como C_p e C_{pk} , argumentando que estes são uma simplificação de um fenómeno complexo. Qualquer estatística que combina informações sobre a média e a variabilidade, e que requer a suposição da Normalidade da amostra para que se possa fazer uma interpretação significativa, é susceptível de ser incorrectamente utilizado.

2.4.4.4 Índice de capacidade em relação ao valor alvo - C_{pmk}

O índice C_{pmk} proposto por Pearn *et al.* considera-se um índice de capacidade de terceira geração pois é construído a partir de dois índices de segunda geração, os índices C_{pk} e C_{pm} [12].

O índice C_{pmk} é definido pela equação (2.15).

$$C_{pmk} = \frac{\min(LSE - \mu, \mu - LIE)}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (2.15)$$

O índice C_{pmk} é um indicador da capacidade dos processos é sensível ao desvio da média relativamente ao valor nominal intervalo, e que o incorpora na tolerância natural do processo.

2.4.4.5 Outros índices de capacidade do processo

Apesar dos índices apresentados serem aqueles com maior utilização, tanto na investigação como na indústria, na literatura surgiram outros índices de capacidade. Estes índices de capacidade propostos atendem às limitações de aplicação dos anteriormente apresentados, e são frequentemente formulados de forma a tornarem-se apropriados a outras distribuições estatísticas da característica da qualidade de interesse. Surgiram também algumas tentativas de formulação de índices de capacidade com o propósito de conseguir uma aplicação generalizada, independente da distribuição da característica (ver as equações (2.17) e (2.18)). Por outro lado, alguns destes índices incluem modificações dos índices C_p e C_{pk} , como as sugeridas por Kane [7].

Khadse e Shinde [8] apresentam no seu trabalho um conjunto de índices de capacidade do processo alternativos com base em diferentes tipos de probabilidade de fracção de conformidade.

Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns dos índices propostos na literatura.

Tabela 2.1 – Exemplos de índices alternativos de capacidade do processo.			
Índice de Capacidade		Observações:	Fonte:
$C_{pc} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\frac{\pi}{2}}E X - T }$	(2.16)	$T = \frac{LSE + LIE}{2}$	[13]
$C_p = \frac{LSE - LIE}{x_{0,99865} - x_{0,00135}}$	(2.17)	$x_{0,99865}$ e $x_{0,00135}$ correspondem aos percentis à direita de 99,865% e 0,135% da distribuição de X.	[14]
$C_{pk} = \min\left\{\frac{LSE - LIE}{x_{0,99865} - \tilde{M}}; \frac{LSE - LIE}{\tilde{M} - x_{0,00135}}\right\}$	(2.18)	\tilde{M} é a mediana	[14]
$C_{pc'} = \frac{1 - p_0}{1 - p}$	(2.19)	p_0 é percentagem mínima de conformidades permitida (pc);	[15]

2.4.4.6 Normalidade e os índices de capacidade do processo

Uma suposição importante subjacente à capacidade dos processos e aos índices C_p e C_{pk} é que a sua interpretação usual baseia-se numa distribuição Normal dos *outputs* do processo. Quando os dados referentes à característica da qualidade X são independentes, mas não Normalmente distribuídos, os índices referidos anteriormente deixam de ser aplicáveis [1]. A explicação pode ser encontrada no fato dos índices de capacidade do processo apresentados anteriormente se basearem sobretudo na média e no desvio padrão do processo, o que em processos com distribuições não Normais pode não reflectir satisfatoriamente as características do processo.

Para contornar este obstáculo têm-se desenvolvido várias abordagens, que são por norma classificadas em cinco grupos [16]:

- Métodos de transformação de dados;
- Desenvolvimento de procedimentos de controlo da qualidade para determinadas distribuições não normais;
- Adaptação de distribuição a dados empíricos;
- Desenvolvimento de procedimentos desprendidos de distribuição;
- Desenvolvimento e utilização de novos índices de capacidade do processo.

Na literatura encontram-se alguns trabalhos que estudam a utilização de dados não Normalmente distribuídos na computação de índices de capacidade dos processos. Trabalhos como os desenvolvidos por Somerville e Montgomery [17], e por Gonzalez e Werner [18] apontam como consequências e riscos da não verificação da suposição de Normalidade da variável de interesse, as seguintes:

- Inadequação da aplicação dos métodos de análise de capacidade de processos normais;
- Índices de capacidade do processo sem valor;
- Disparidade entre o número de DPMO estimado e o número real.

2.4.4.7 Análise dos índices de capacidade do processo

A comparação entre a capacidade do processo e as tolerâncias de fabrico – especificadas no projecto – aponta para alguns planos de acção [19]:

1. Se o processo for inadequado para satisfazer as tolerâncias:
 - a. Mudar o trabalho para outro processo com capacidade apropriada.
 - b. Melhoria da capacidade. É recomendável caso os valores obtidos sejam diferentes dos alcançados em processos semelhantes. Se o processo estiver sob controlo estatístico, é aumentar a capacidade. Se não estiver sob

controlo estatístico, as causas devem ser identificadas para os pontos fora de controlo e consequentemente, a remoção dessas causas pode resultar numa melhoria da capacidade.

- c. Analisar as tolerâncias.
2. Se a capacidade do processo for igual à tolerância, isso deve ser tratado como na situação 1, uma vez que significa que o processo deve ser centrado exactamente no valor nominal, não permitindo a ocorrência de factores tais como desgaste de ferramentas. No entanto, caso tais factores sejam negligenciáveis ou se for possível permitir uma pequena percentagem de peças fora dos limites de tolerância, então deve-se proceder de acordo com a situação 3.
 3. Se a capacidade do processo for adequada para satisfazer tolerâncias:
 - a. Se a capacidade do processo for da ordem de dois terços a três quartos da tolerância ou menos, a situação é aceitável. O processo todo deve produzir bom trabalho durante um período de tempo longo, caso sejam feitas amostras periódicas para se verificar o seu acerto.
 - b. Se for inferior a metade da tolerância, não proceder a qualquer alteração, a não ser que a redução da tolerância se traduza nalguma melhoria. A possibilidade de ser mais rígido com a tolerância numa das partes pode permitir que se tome atitude oposta noutra.

2.4.5 Bases de dados da capacidade do processo

Recentemente, alguns autores sugeriram a criação de bases de dados de capacidade do processo [20], [21] e [22]. Estas bases de dados incluem os valores-alvo e as tolerâncias actuais para um processo em particular, o material e combinações de recursos. A aplicação deste tipo de bases de dados prende-se com a modelação do comportamento previsível de um processo.

No trabalho desenvolvido por Tata e Thornton [22], os autores demonstram que a suposição de existência de dados completos e precisos sobre a capacidade do processo, estabelecida pela maioria dos trabalhos académicos em modelação preditiva e projecto robusto, não corresponde totalmente à realidade e que embora as empresas tenham criado bases de dados dos processos, esta informação não é utilizada pelo processo. Uma das conclusões a que se chegou neste trabalho, é que as bases de dados são utilizadas com sucesso na produção para monitorizar os processos mas não são utilizadas para melhorar o projecto. Isto resulta da falta de comunicação entre o projecto e produção.

Delaney *et al.* [23] mostraram no seu trabalho a importância da utilização de dados da capacidade dos processos para melhoramento do projecto. No seu trabalho descrevem um método que recorre a informação da capacidade do processo para prever a variação expectável da performance do produto em fases iniciais do projecto.

2.5 Metodologia 6-Sigma

A metodologia conhecida por *6-Sigma* viu a sua reputação crescer nos últimos anos, consequência dos resultados económicos conseguidos com a sua aplicação em várias empresas de prestígio.

A metodologia foca-se na melhoria do processo, através da melhoria e da redução da variabilidade, o que conduz a uma redução do número de defeitos e uma beneficiação da qualidade do produto, à semelhança da maioria dos princípios e técnicas do âmbito da qualidade [24].

O nível de desempenho de um processo é medido em termos de sigma (o desvio padrão, σ). Uma melhoria do processo equivale a um aumento do nível sigma, o que em termos tradicionais, corresponde a uma melhoria da capacidade do processo.

Segundo Pereira e Requeijo [1] a metodologia *6-Sigma* enquadra-se na categoria de uma técnica de capacidade do processo. Nas metodologias tradicionais da qualidade o padrão é que num processo capaz os limites de especificação deverão estar a pelo menos 4 sigma da média do processo. Ao invés, na metodologia *6-Sigma* o processo deve ser operado de forma que o limite de especificação mais próximo da média do processo esteja a pelo menos seis sigma (Figura 2.7).

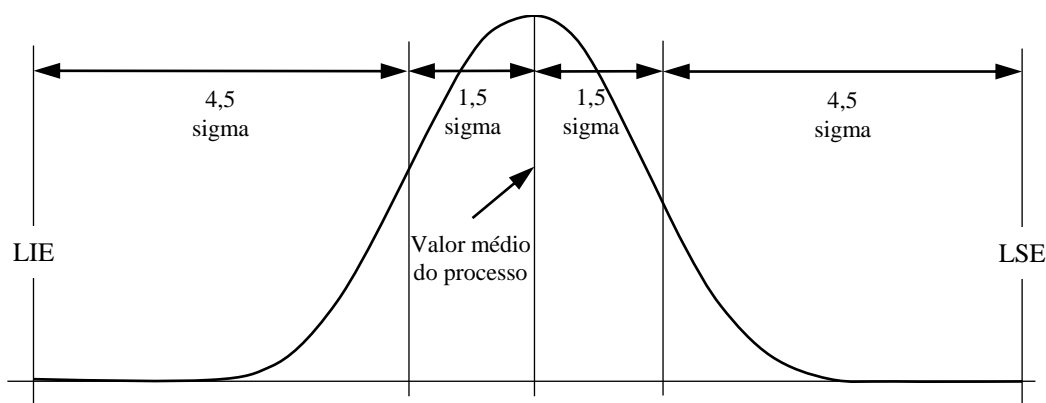


Figura 2.7 – Interpretação gráfica da metodologia *6-Sigma*, adaptado de [24].

Na prática, a longo prazo, verifica-se um deslocamento da média da maioria dos processos [25]. Ao considerar que o processo é aproximado por uma distribuição Normal centrada com o valor nominal da especificação, atribui-se tradicionalmente a um desempenho

de nível 3-Sigma um número de 2700 ppm de defeitos. Atendendo ao deslocamento da média, o valor passa a ser de 66800 ppm de defeitos. Para um nível 6-Sigma de desempenho, e considerando o referido deslocamento da média, ter-se-á 3,4 ppm de defeitos ou, na terminologia 6-Sigma, 3,4 defeitos por milhão de oportunidades (DPMO). Assim, quanto mais elevado for o nível Sigma, menor será o número de defeitos e menor deverá ser a variabilidade dos processos.

O nível sigma (ς) de um processo pode ser obtido através da equação (2.20) [26],

$$\varsigma = \Phi^{-1}\left(1 - \frac{DPMO}{10^6}\right) + 1,5 \quad (2.20)$$

onde Φ^{-1} é a função de distribuição Normal inversa.

2.6 Custo da perda de qualidade

O custo da perda de qualidade (*quality loss* na literatura anglo-saxónica) é o custo, suportado pelo cliente, associado à perda de funcionalidade de um produto devido à reduzida qualidade ou à deterioração da mesma. Este custo engloba os custos suportados pelo cliente na compra do produto e os custos associados à falha da funcionalidade durante o uso do produto.

De acordo com Taguchi *et al.* [27] pode-se definir a perda de qualidade como:

“O prejuízo que um produto provoca à sociedade a partir do momento que é disponibilizado para entrega. Perdas como a falha na funcionalidade, riscos associados à saúde, poluição, custos operacionais e custos de manutenção encontram-se incluídos”.

A ideia central da teoria proposta inicialmente por Taguchi *et al.* [27] é a de que os problemas de qualidade surgem devido a variações funcionais das características (§ 2.2), que estão limitadas por tolerâncias especificadas no projecto. As tolerâncias são definidas em relação a um valor nominal que define a funcionalidade ideal do produto. A teoria introduz a noção de produto robusto como sendo aquele que não é sensível a variações causadas por fontes de variação.

Considerando que m é o valor nominal de uma especificação, então a função perda de qualidade $L(y)$ pode ser obtida através de equação (2.21),

$$L(y) = \frac{L}{2}(y - m)^2 = c(y - m)^2 \quad (2.21)$$

onde c é uma constante.

Na Figura 2.8 encontra-se uma representação gráfica da função perda de qualidade genérica. A consideração de uma função quadrática é válida e tem sido extensamente aplicada

na literatura de estatística e controlo da qualidade. A atribuição de tolerâncias largas, conduz a maior perda de qualidade e, portanto, a maiores custos de montagem e da qualidade e menores aptidões funcionais do produto.

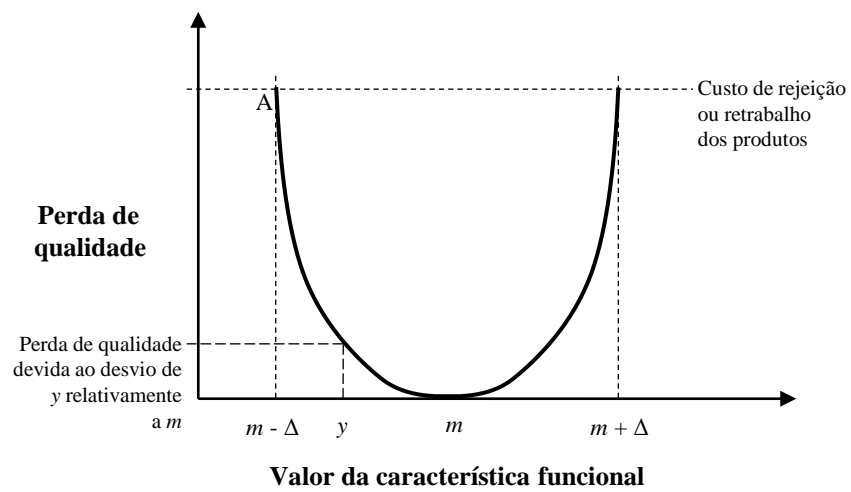


Figura 2.8 - Perda de qualidade vs desvio relativamente ao valor alvo (m), adaptado de [27].

3 Projecto de tolerâncias dimensionais

3.1 Introdução

A alocação de tolerâncias dimensionais e geométricas a características de um componente mecânico, justifica-se apenas quando estas apresentam contacto, ou outro tipo de interacção, com outras características do mesmo componente ou de outros componentes mecânicos integrados num sistema mecânico.

A especificação de tolerâncias dimensionais apropriadas no projecto de elementos mecânicos é reconhecida pela indústria como um factor chave nos esforços requeridos para o aumento da produtividade pois não existe, provavelmente, outro esforço de melhoria do projecto que resulte em maiores benefícios, por um custo menor, que uma atribuição cuidada de tolerâncias. O procedimento de atribuição de tolerâncias, apesar de poder parecer de menor importância, pode ter um impacto considerável no custo e na qualidade. No lado do projecto de engenharia, este afecta a funcionalidade do produto final, o que pode causar baixa performance. Do lado da produção, as tolerâncias impostas determinam a selecção de máquinas-ferramentas, de ferramentas e de acessórios; nível de habilidade do operador; precisão da inspecção e calibração. De uma forma resumida, afecta quase todos os aspectos do ciclo de vida de um produto.

Neste capítulo abordam-se conceitos básicos sobre projecto de tolerâncias e faz-se uma revisão dos respectivos métodos de síntese com maior utilização.

3.2 Revisão da literatura

Historicamente, a síntese de tolerâncias na fase de projecto atraiu mais atenção do que a síntese de tolerâncias na fase de planeamento do processo. Contudo, a investigação nestas áreas convergiu na mesma direcção e têm sido propostos inúmeros métodos de síntese de tolerâncias.

Uma revisão da literatura recente sugere que as técnicas existentes para a síntese de tolerâncias podem ser agrupadas em três categorias: os métodos tradicionais, métodos focados na produção e métodos focados na qualidade [28].

Os métodos tradicionais sustentam-se na experiência e intuição do engenheiro para a atribuição de tolerâncias, não consideram a relação custo-tolerância e são implementados separadamente no projecto e nas etapas de planeamento do processo. Alguns exemplos típicos

destes métodos são o método da escala proporcional e o método da precisão constante. Todos estes métodos fixam as tolerâncias na fase de projecto sem considerar os processos de fabrico. Os planeadores dos processos estão, assim, obrigados a trabalhar com intervalos mais apertados de valores possíveis de tolerância do processo, que conduzem a custos de produção mais elevados.

Dentro do tópico dos métodos de síntese de tolerâncias, a maioria dos artigos publicados incide sobre métodos de optimização de tolerâncias que utilizam modelos custo-tolerância, contrariamente aos métodos intuitivos. Speckhart [29] e Spotts [30] apresentaram aquelas que se consideram as primeiras tentativas, encontradas na literatura, de atribuir um conjunto de tolerâncias óptimas que cumpra os requisitos funcionais do projecto e, simultaneamente, minimize o custo de produção.

Em meados da década de 1990 surgiu uma nova direcção de investigação, na área da síntese de tolerâncias. Taguchi *et al.* [27] sugeriram que a perda de qualidade fosse tratada como um custo aditivo ao custo de produção. A função de perda de qualidade transforma a degradação num custo para a sociedade que pode então ser incluído numa função objectivo juntamente com os custos de produção.

No seguimento desta ramificação da investigação na área da síntese de tolerâncias surgiram diversos métodos focados na optimização da qualidade. São exemplos os trabalhos de Kapur *et al.* [31] em que os autores apresentam um modelo de optimização geral, em termos de custos associados às variâncias dos componentes e às perdas associadas com a variabilidade da característica da qualidade, o modelo de Vasseur *et al.* [32] em que as tolerâncias são atribuídas de acordo com a maximização do lucro e o trabalho de Krishnaswami e Mayne [33] no qual os autores apresentam um procedimento para incorporar conceitos de perda da qualidade no processo de alocação das tolerâncias óptimas em que, o custo de produção e a perda de qualidade estimada são considerados simultaneamente.

No seguimento da investigação de métodos de síntese de tolerâncias associados à engenharia da qualidade surge, recentemente, a aplicação de índices de capacidade do processo ou de dados provenientes do estudo da capacidade dos processos, na síntese de tolerâncias.

Alguns métodos como os apresentados Ye e Salustri [28], Ngoi e Teck [34] e por Islam [35], sugerem que as tolerâncias dos componentes sejam atribuídas com o auxílio dos responsáveis do processo, promovendo o ambiente de engenharia simultânea. No primeiro, os autores recorrem a um modelo de optimização não-linear, que minimiza simultaneamente o custo de produção e a perda de qualidade. No segundo, os autores propuseram com o seu trabalho, um método de optimização de tolerâncias através de programação linear. A função objectivo é maximizar as tolerâncias residuais dos processos e os constrangimentos incluem os requisitos de montagem e os constrangimentos dos processos (capacidades dos processos). No

terceiro, o autor revê as ferramentas de alocação de tolerâncias actualmente disponíveis, utilizando-os para criar uma ferramenta mais ajustada a aplicações industriais. O autor aponta ainda a falta de dados actualizados sobre o custo, como maior obstáculo à aplicação das ferramentas de alocação de tolerâncias, e apresenta uma estratégia de alocação de tolerâncias, através de uma metodologia que tem em consideração a capacidade dos processos.

Lee e Wei [36] utilizaram um método de optimização através de programação linear, que incorpora as capacidades dos processos e o custo de produção, para atribuir as tolerâncias de processo, minimizando a perda da qualidade quando surgem componentes não-conformes.

Existem outros métodos, como os propostos por Jeang [37], Panichku [38] e Koch *et al.* [39], que combinam métodos estatísticos (para obtenção das capacidades dos processos e das relações custo-tolerância, qualidade-tolerância) e técnicas de optimização para determinação de tolerâncias. Mais métodos, como os propostos por Cao *et al.* [40] recorrem a técnicas de optimização que utilizam os índices de capacidade do processo como restrições.

Enquanto na maioria dos métodos propostos se verifica o pressuposto da Normalidade dos dados, Liao [41] desenvolveu um método de síntese de tolerâncias com o pressuposto de dados não-normais. No estudo apresentado por Liao, o autor desenvolve um modelo de optimização que engloba a perda de qualidade, custos de produção e custos de retrabalho para determinar tolerâncias.

Algumas abordagens, como a sugerida por Bargelis [42], propõem métodos de síntese de tolerâncias que visam a maximização da capacidade do processo (*design for process capability and capacity* – DFPC – na literatura anglo-saxónica), através do projecto do produto. Paralelamente, este método minimiza o custo de produção do produto introduzindo os índices de capacidade do processo, na fase inicial de concepção do produto.

Dos trabalhos revistos, o trabalho de apresentado por Hernández e Tutsch [43] é singular pois desenvolve um método de especificações dinâmicas para síntese de tolerâncias. Este método pode ser aplicado em montagens de componentes com grande variabilidade. O ponto diferenciador dos restantes métodos é que, este método sugere o ajustamento quase contínuo das tolerâncias das dimensões dos componentes de forma a garantir a montagem do conjunto, em vez da redução do impacto das fontes de variação dos processos.

3.3 Generalidades

3.3.1 Tolerâncias dimensionais

Como se verificou na secção §2.2, os processos de fabrico apresentam variação intrínseca que justifica a imprecisão das dimensões da peça produzida. A utilização de tolerâncias resulta da consciencialização de que uma peça não pode ser fabricada com uma dimensão exacta, definida previamente e, portanto, é necessário especificar uma determinada inexactidão que é tolerável, para garantir a funcionalidade. No projecto mecânico utilizam-se dois tipos de tolerâncias: as dimensionais e as geométricas. Nas matérias apresentadas adiante, consideram-se apenas as tolerâncias dimensionais, pois o estudo efectuado recaiu sobre estas.

A funcionalidade de um componente é garantida², à partida, se a dimensão fabricada estiver contida entre duas cotas limite - a cota máxima $C_{máx}$ e a cota mínima $C_{mín}$. A diferença entre estas duas cotas constitui a tolerância dimensional, como se mostra na Figura 3.1. A cota de referência com que se designa a grandeza a verificar chama-se cota nominal C_n [44].

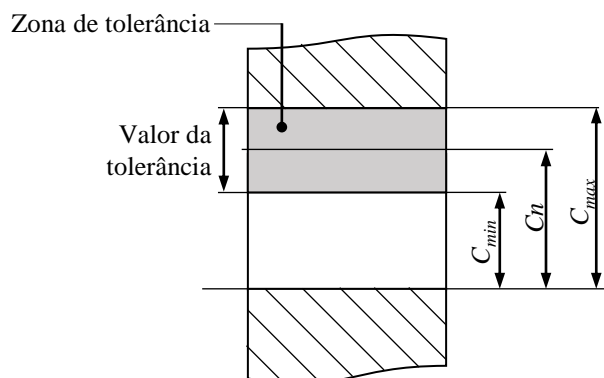


Figura 3.1 – Relação gráfica entre cotas nominal, mínima e máxima [44].

A zona de tolerância, representada na Figura 3.1, é a zona compreendida as duas linhas que representam a cota mínima e a cota máxima. A zona de tolerâncias é definida pelo valor da tolerância e pela posição relativa à linha de zero, que representa a cota nominal. Quando a zona de tolerância é dividida igualmente a partir da dimensão nominal, diz-se que é uma tolerância bilateral.

A norma ISO 2768-1:1989 sugere a utilização de tolerâncias normalizadas, representadas com o símbolo IT (*International Tolerance*), para os sistemas de ajustamentos e limites. As tolerâncias normalizadas são apresentadas na norma em tabelas que apresentam

² Um componente com tolerâncias dimensionais e geométricas especificadas deve satisfazer ambas independentemente para garantir a funcionalidade.

graus das tolerâncias normalizadas, ou seja, grupos de valores de tolerâncias que se considera que correspondem ao mesmo nível de precisão para todas as cotas nominais.

3.3.2 Análise funcional de sistemas mecânicos

A análise funcional de um sistema mecânico compreende a identificação de cotas funcionais e determinação das suas dimensões nominais e respectivas tolerâncias. Da análise funcional de um conjunto resultam cadeias mínimas de cotas, que contêm o número mínimo de dimensões do conjunto funcional e que descrevem a funcionalidade do mesmo.

A cotação funcional baseia-se unicamente na funcionalidade das peças a cotar e impõe que se comece por efectuar uma análise funcional do componente, de forma a identificar quais as dimensões que intervêm na funcionalidade do sistema mecânico. As cotas nominais destas dimensões deverão ser alvo de um estudo criterioso do toleranciamento. A importância da cotação funcional centra-se na capacidade de alargamento de tolerâncias sem pôr em causa a funcionalidade exigida pelo projecto [44].

3.3.3 Relações custo-tolerância

A importância do projecto de tolerâncias dimensionais transpõe a garantia de funcionalidade do sistema ou a selecção de processos de fabrico. O projecto de tolerâncias dimensionais influencia significativamente os custos de produção de componentes mecânicos. Uma especificação de tolerâncias dimensionais menos adequada, na fase de projecto, condiciona todos os custos a jusante. Pode afirmar-se que, de uma forma geral, as tolerâncias destinam-se a economizar dinheiro.

O custo de produção é o custo necessário para produzir um produto que funcione de acordo com as especificações. A relação custo de produção-tolerância enfatiza que tolerâncias apertadas resultam em custos de produção mais elevados enquanto tolerâncias amplas resultam em custos de produção mais baixos (ver a Figura 3.2). Um custo mais elevado está tipicamente associado com configurações/instalações adicionais, operações adicionais de precisão e dispositivos de medição, a necessidade de máquinas e/ou ferramentas mais dispendiosas, e a necessidade de baixar a taxa de produção [45].

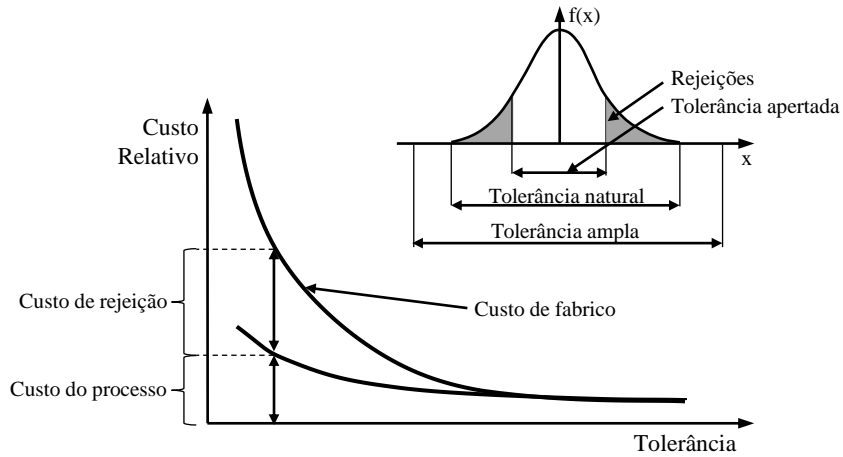


Figura 3.2 – Relação entre custo de produção e tolerância atribuída, adaptado de [46].

As reduções mais significativas nos custos de produção estão mais dependentes de alterações no projecto do que de modificações de métodos ou sistemas de produção. A dificuldade na atribuição de tolerâncias está em encontrar a gama de tolerâncias que minimiza os custos pois, se para garantir a intermutabilidade, é necessário a atribuição de tolerâncias apertadas, os custos de fabrico aumentam.

Devido à importância da relação custo-tolerância pode-se observar, através de pesquisa bibliográfica, que foi desenvolvida muita investigação com o intuito de determinar a relação custo-tolerância. Como resultado dos progressos unificadores do projecto de tolerâncias e da gestão da qualidade dos processos, a investigação existente sobre alocação de tolerâncias considera o custo de duas formas principais: custo de produção e custo da perda de qualidade, que recentemente têm sido considerados simultaneamente.

Na literatura da especialidade as funções matemáticas que modelam a curva custo-tolerância com maior aceitação e utilização são [45]:

- Função dos Recíprocos;

$$f_{C-T} = \sum_{i=1}^n [a_i + b_i (t_i)^{-1}] \quad (3.1)$$

- Função dos Recíprocos Quadrados;

$$f_{C-T} = \sum_{i=1}^n [a_i + b_i (t_i)^{-2}] \quad (3.2)$$

- Função Exponencial;

$$f_{C-T} = \sum_{i=1}^n [a_i + b_i e^{-C_i/t_i}] \quad (3.3)$$

- Função de Shutherland ou das Recíprocas Potências;

$$f_{C-T} = \sum_{i=1}^n \left[a_i + b_i (t_i^2)^{-C_i/2} \right] \quad (3.4)$$

- Função de Michael-Siddal ou da Potência Exponencial/Recíproca.

$$f_{C-T} = \sum_{i=1}^n \left[a_i + b_i t_i^{-C_i} e^{-D_i t_i} \right] \quad (3.5)$$

Os coeficientes a_i , b_i , c_i e d_i são determinados a partir da curva custo-tolerância para cada par processo-operação. O coeficiente a_i depende dos custos fixos (custos de preparação, de ferramentas, de materiais e outros custos assignados a tarefas não produtoras de valor acrescentado para o produto) e os coeficientes b_i , c_i e d_i dependem dos custos variáveis (custos directos de fabrico para produzir um componente com a tolerância especificada) [44].

Wu *et al.* [47] realizaram um estudo no qual compararam os modelos acima mencionados, baseando-se na capacidade de cada modelo ajustar a relação custo-tolerância a dados reais. Da comparação concluiu-se que o modelo mais preciso é o modelo de Michael-Siddal pois é aquele que apresenta erros menores de ajustamento da curva. Outra das conclusões que o estudo aponta é de que todos os cinco modelos apresentam uma boa aproximação à curva de dados reais para tolerâncias largas ($\geq 0,35$ mm), mas para tolerâncias mais apertadas ($\leq 0,1$ mm) apresentam erros superiores.

3.3.4 Problemas de análise e de síntese de tolerâncias

As tolerâncias são um elo de ligação entre o projecto e a produção, e a necessidade de intermutabilidade dos componentes e de redução dos custos de produção, obriga a um estudo criterioso das tolerâncias. O projecto de tolerâncias compreende na sua génese dois problemas, o da análise e o da síntese de tolerâncias, cuja distinção se encontra ilustrada na Figura 3.3. De entre estes dois problemas, o da síntese é aquele com que os engenheiros mais comumente se confrontam.

No problema de análise, as tolerâncias dos componentes são todas conhecidas ou especificadas e a tolerância da montagem é obtida com base num modelo analítico. A análise de tolerâncias prende-se com o problema da intermutabilidade e com a variação natural dos processos de fabrico e montagem. É um processo iterativo, visto que as tolerâncias devem ser redesenhadas ou redimensionadas até que os requisitos de projecto sejam cumpridos.

No problema de síntese, ou alocação, a tolerância dimensional do conjunto é especificada através dos requisitos de projecto, mas não o são as tolerâncias dos componentes. O processo de síntese de tolerâncias dimensionais consiste na distribuição racional da tolerância

disponível do conjunto entre os componentes, de forma a reduzir o custo de produção mas conservando os níveis de qualidade exigidos [44].

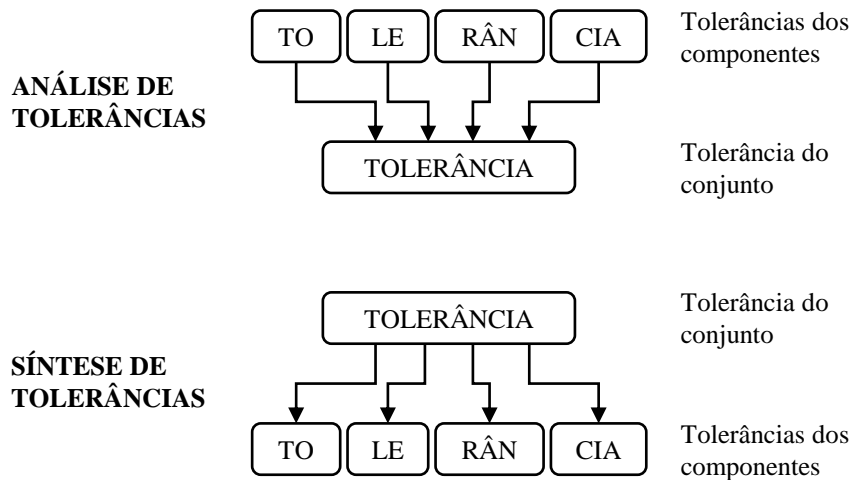


Figura 3.3 – Ilustração dos conceitos de análise e de síntese de tolerâncias, adaptado de [44].

A análise e a síntese de tolerâncias distinguem-se ainda pela fracção de aceitação do processo de montagem, que é uma medida da qualidade que reflecte a percentagem de conjuntos que cumpre as tolerâncias exigidas. Na análise de tolerâncias esta é desconhecida enquanto na síntese esta é especificada como um requisito de projecto [48].

3.4 Síntese de tolerâncias

Como já se referiu, no processo de síntese de tolerâncias, a tolerância dimensional do conjunto deve ser distribuída racionalmente pelos componentes, utilizando um método analítico. Podem fazer-se dois tipos de considerações relativamente às características das tolerâncias dos componentes:

1. Se as tolerâncias são pré-determinadas ou determináveis;
2. Tipo de distribuição de frequências.

As tolerâncias dos componentes são pré-determinadas (*np*) quando os componentes forem normalizados, como sucede no caso de rolamentos ou chavetas, ou, se estiverem sujeitas a outro tipo de restrição, como a presença noutros encadeamentos; caso contrário, serão determináveis (*nd*). Para as tolerâncias determináveis deve definir-se o tipo de distribuição de frequência. Tipicamente, os tipos de distribuição de frequência utilizados no toleranciamento de sistemas mecânicos são a distribuição rectangular e a distribuição Normal, abordadas no §Anexo A.

A síntese racional das tolerâncias dos componentes requer o estabelecimento de uma regra para a distribuição da tolerância de montagem entre os componentes. Historicamente, os engenheiros mecânicos utilizaram dois tipos de modelos de tolerâncias para analisar a tolerância do requisito funcional, um modelo que garante a intermutabilidade total dos componentes e um modelo estatístico, contudo na literatura da especialidade podem encontrar-se vários métodos de síntese de tolerâncias, que podem ser agrupados como:

- Modelo da intermutabilidade total (*Worst-Case Model* - WCM);
- Modelo estatístico simples (*Root Sum of the Squares Model* - RSS);
- Método de síntese por tolerâncias iguais;
- Método proporcional;
- Método da precisão constante;
- Métodos de optimização de custos/produção;

3.4.1 Modelo da intermutabilidade total

Este modelo é o mais simples e mais conservativo das abordagens tradicionais. É utilizado em casos em que é necessário assegurar, através do projecto, que os componentes dão sempre montagem, garantindo a intermutabilidade total dos componentes, independentemente da distribuição de tolerâncias e da cadeia de cotas, que deve ser a mínima. É também desejável atribuir as tolerâncias individuais de tal maneira que todos são igualmente produzíveis.

O modelo da intermutabilidade é utilizado quando:

1. Não existe informação que caracterize os processos de fabrico dos componentes, o que torna inexequível uma análise estatística;
2. A taxa de rejeição admissível é nula.

No modelo da intermutabilidade total, a tolerância de conjunto é calculada somando linearmente as tolerâncias dos componentes:

$$T_{conj} = \sum_{i=1}^n t_i \quad (\text{Unidimensional}) \quad (3.6)$$

$$T_{conj} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial g}{\partial X_i} \cdot t_i \right| \quad (\text{Multidimensional}) \quad (3.7)$$

onde:

T_{conj} – Tolerância de conjunto;

t_i – Tolerância dos elementos funcionais na cadeia de cotas;

n – Número de elementos funcionais na cadeia de cotas.

$\frac{\partial g}{\partial X_i}$ – Derivada da função restrição g_i .

A soma linear de tolerâncias assume que todas as tolerâncias dimensionais individuais irão ocorrer no pior limite ao mesmo tempo. Consequentemente, o modelo da intermutabilidade atribui, normalmente, tolerâncias individuais apertadas, o que significa custos de produção elevados.

Na modelo da intermutabilidade total, o projectista não estabelece pressupostos sobre a forma como as dimensões dos componentes individuais são distribuídas dentro dos intervalos de tolerância pois assume que todas as dimensões dos componentes ocorrem simultaneamente nos limites das suas especificações. O único pressuposto é que todas as componentes estão dentro dos limites da tolerância, o que poderá não se verificar e mesmo assim as componentes continuarão a dar montagem. Esta é a maior vantagem do método.

A maior desvantagem do modelo da intermutabilidade total surge quando há um grande número de componentes ou uma tolerância de conjunto pequena. Nestas aplicações, o modelo da intermutabilidade total gera tolerâncias apertadas, o que é mais dispendioso. Como alternativa a este método surgiu o modelo estatístico com aplicação em grandes volumes de produção.

3.4.2 Modelo estatístico simples

O modelo estatístico simples baseia-se no princípio que, a probabilidade de ocorrência de ajustamentos cujas partes tenham dimensões reais próximas ou iguais aos limites da tolerância é reduzida. Assim, combinações de valores extremos de tolerância são pouco prováveis, comparadas com combinações de valores médios.

Este facto evidencia os conceitos fundamentais que estão na base do modelo estatístico: o teorema do limite central e o facto de uma distribuição Normal estar completamente definida pelos seus dois primeiros momentos (média μ e variância σ^2) [2]. O teorema do limite central considera que a distribuição resultante da soma de quaisquer distribuições de variáveis independentes, com média e variância finitas, se aproxima da distribuição Normal, quando o número de distribuições é suficientemente alto.

No caso das dimensões reais dos diferentes componentes seguirem uma distribuição Normal, o modelo estatístico simples atribui a tolerância do conjunto de acordo com:

$$T_{conj} = \sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2} \quad (\text{Unidimensional}) \quad (3.8)$$

$$T_{conj} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \cdot t_i \right)^2} \quad (\text{Multidimensional}) \quad (3.9)$$

A fiabilidade de utilização deste modelo está relacionada com o tipo de distribuição considerada. Para distribuições não simétricas, ou com desvios do valor médio (ocorrências inevitáveis na realidade) as tolerâncias atribuídas pelo modelo estatístico simples podem induzir numa percentagem de rejeição que pode assumir valores insatisfatórios.

A obtenção da equação (3.8) baseia-se nos seguintes pressupostos [49]:

- Todas as dimensões nominais, D_i , associadas às tolerâncias t_i , são estatisticamente independentes;
- O valor médio de D_i é grande em comparação com o desvio padrão σ_i . A recomendação é que D_i / σ_i deve ser superior a 5;
- O valor nominal corresponde ao valor médio de D_i ;
- As dimensões seguem distribuições Normais ou Gaussianas;
- As peças são montadas aleatoriamente;
- Cada uma das dimensões é igualmente produzível;
- Cada uma das sensibilidades tem uma magnitude de 1.

A validade de cada um destes pressupostos terá impacto na forma como a previsão realizada pelo método estatístico corresponde à realidade da produção.

O modelo estatístico simples origina tolerâncias maiores dos componentes para uma dada tolerância de conjunto, mas o risco de ocorrência de defeitos é superior. O modelo estatístico simples assume que [49]:

- As tolerâncias dos componentes estão vinculadas às capacidades dos processos. Este modelo assume que, quando o projectista muda a tolerância, as capacidades do processo também se vão alterar;
- Todas as distribuições do processo estão centradas no ponto médio da dimensão. Não é permitido deslocamentos do valor médio;
- Todas as dimensões dos componentes são independentes;
- Tanto os componentes capazes como os defeituosos são todos utilizados na montagem. O modelo não considera a inspecção da produção;
- Os componentes incluídos em qualquer conjunto são seleccionados aleatoriamente.

Apesar de se fazer a suposição de que todas as tolerâncias são igualmente produzíveis, esta não se verifica geralmente. A única forma de se saber efectivamente se uma tolerância é produzível, é através do entendimento da capacidade do processo para cada dimensão.

A Figura 3.4 mostra como as suposições, estabelecidas pelo modelo da intermutabilidade total e o modelo estatístico simples, sobre a distribuição das dimensões

produzidas afecta os requisitos funcionais. Na Figura 3.4, o eixo horizontal representa a dimensão produzida. O eixo vertical representa o número de componentes que são produzidos com uma dimensão do eixo horizontal. No modelo da intermutabilidade total, verifica-se que a totalidade dos componentes produzidos irá assegurar o requisito funcional, o que o torna uma abordagem conservadora. No modelo estatístico simples assume-se que a maioria das dimensões dos componentes produzidos está centrada na dimensão média. Esta abordagem menos conservativa apresenta diversos benefícios.

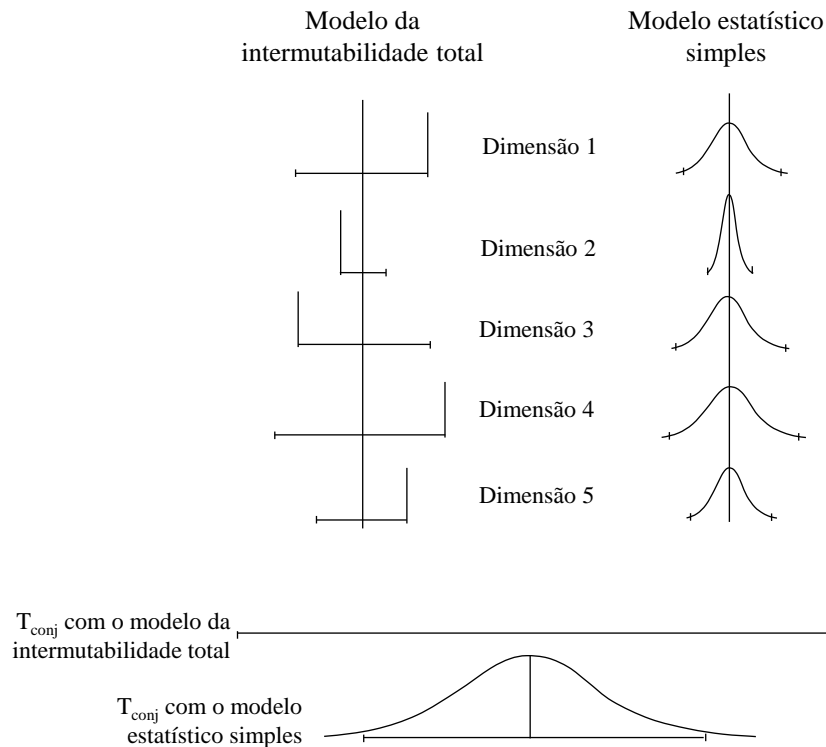


Figura 3.4 – Combinação das variações das dimensões dos componentes de acordo com os modelos da intermutabilidade total e estatístico simples, adaptado de [49].

A maior vantagem de utilização do modelo estatístico simples relativamente ao modelo da intermutabilidade total prende-se com a percepção da tendência das dimensões produzidas estarem centradas numa dimensão média.

Na análise de tolerâncias utilizam-se por vezes métodos estatísticos avançados, como o método da simulação de Monte Carlo e o método dos momentos, pois permitem recorrer a distribuições não-Normais como modelos de variação dos componentes. Estes métodos podem fornecer melhores estimativas do número de defeitos produzidos que uma simples análise estatística, quando as distribuições dos componentes são distribuições não-normais conhecidas. Contudo, não são uma ferramenta conveniente de síntese de tolerâncias devido à necessidade de uma computação intensiva [50].

3.4.3 Método de síntese por tolerâncias iguais

Neste método, a tolerância do conjunto é dividida equitativamente pelos componentes com tolerâncias determináveis. Geralmente, este método não apresenta resultados fiáveis pois não é sustentado por qualquer base teórica e a sua utilização prende-se com a estimativa das tolerâncias individuais a atribuir. As relações utilizadas para aplicar o método são [51]:

- Para o modelo da intermutabilidade total:

$$T_{conj} = \sum_{j=1}^m t_j + nd \times t_{o,i} \text{ ou,} \quad (3.10)$$

$$t_{o,i} = \frac{T_{conj} - \sum_{j=1}^m t_j}{nd} \quad (3.11)$$

- Para o modelo estatístico simples:

$$T_{conj}^2 = \sum_{j=1}^m t_j^2 + nd \times t_{o,i}^2 \text{ ou,} \quad (3.12)$$

$$t_{o,i} = \sqrt{\frac{T_{conj}^2 - \sum_{j=1}^m t_j^2}{nd}} \quad (3.13)$$

onde:

- n – Número de elementos funcionais na cadeia de cotas;
- m – Número de elementos funcionais com tolerâncias fixas na cadeia de cotas;
- t_o – Tolerância inicial para os elementos funcionais, excepto os normalizados.

3.4.4 Método proporcional

A aplicação do método proporcional inicia-se com a atribuição de tolerâncias às dimensões funcionais dos componentes do conjunto, com base no processo e/ou na experiência, ou por imposição do projecto. As imposições do projecto compreendem situações em que uma das cotas da cadeia corresponde à dimensão de um componente normalizado.

Após o processo a atribuição, segundo um modelo de análise, verifica-se se as tolerâncias atribuídas satisfazem a restrição funcional especificada. Nos casos em que a especificação é cumprida, mantêm-se as tolerâncias atribuídas inicialmente. Nos casos em que não se verifique o cumprimento da especificação, as tolerâncias t_o , excepto as impostas pelo

projecto, admitem um factor de proporcionalidade, f_p , mantendo constante a relação entre as tolerâncias [50].

As tolerâncias das dimensões elementos funcionais não normalizados são dadas por:

$$t_i = f_p \times (t_0)_i \quad (3.14)$$

O factor de proporcionalidade, f_p , obtém-se através do modelo de análise utilizado:

- Para o modelo da intermutabilidade total:

$$f_p = \frac{T_{\text{conj}} - \sum_{j=1}^m t_j}{\sum_{i=1}^{n-m} (t_0)_i} \quad (3.15)$$

- Para o modelo estatístico simples:

$$f_p = \left(\frac{T_{\text{conj}}^2 - \sum_{j=1}^m t_j^2}{\sum_{i=1}^{n-m} (t_0)_i^2} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

onde:

n – Número de elementos funcionais na cadeia de cotas;

m – Número de elementos funcionais com tolerâncias fixas na cadeia de cotas;

t_0 – Tolerância inicial para os elementos funcionais, excepto os normalizados.

A aplicação deste método inicia-se com a especificação de tolerâncias dos componentes recorrendo a outro método. Caso a tolerância do conjunto não atenda à restrição funcional, aplica-se o método proporcional de forma a reduzir tolerância do conjunto através do factor de proporcionalidade, f_p .

3.4.5 Método da precisão constante

Este método baseia-se na regra que estabelece que a tolerância de um componente aumenta de acordo com a raiz cúbica da sua cota nominal [50].

No método da precisão constante as tolerâncias são distribuídas em função da cota nominal, e das condições a satisfazer na montagem, ponderadas no factor de precisão:

$$t_i = f_{pc} (Cn_i)^{1/3} \quad (3.17)$$

onde:

Cn – Cota nominal;
 f_{pc} – Fator de precisão.

O factor de precisão, f_{pc} , é calculado através do modelo de análise:

- Para o modelo da intermutabilidade total:

$$f_{pc} = \frac{T_{conj} - \sum_{j=1}^m t_j}{\sum_{i=1}^{n-m} (Cn_i)^{1/3}} \quad (3.18)$$

- Para o modelo estatístico simples:

$$f_{pc} = \left(\frac{T_{conj}^2 - \sum_{j=1}^m t_j^2}{\sum_{i=1}^{n-m} (Cn_i)^{2/3}} \right)^{1/2} \quad (3.19)$$

onde:

- n – Número de elementos funcionais na cadeia de cotas;
- m – Número de elementos funcionais com tolerâncias fixas na cadeia de cotas.

Verifica-se que os dois métodos de síntese apresentados não consideram a relação custo-tolerância, embora façam uma distribuição racional de tolerâncias, nem optimizam a atribuição dos valores ao contrário da maioria das técnicas de síntese de tolerâncias que se baseiam na optimização.

3.4.6 Métodos que utilizam técnicas de optimização

Como se referiu anteriormente, o valor das tolerâncias está associado aos custos de produção. Este é um facto que uma síntese racional de tolerâncias terá que ter em consideração, independentemente do método utilizado.

A optimização visa o aumento das tolerâncias dos elementos funcionais com o intuito de reduzir os custos. Para que não se verifique prejuízo da tolerância especificada do conjunto, o aumento de uma tolerância de uma cadeia de cotas deve implicar a redução das restantes, para que seja cumprida a funcionalidade resultando na necessidade de sucessivas iterações. Para a optimização das funções apresentadas na Secção 3.3.3 podem utilizar-se diferentes métodos matemáticos, nomeadamente o método dos multiplicadores de Lagrange. As limitações identificadas nestes métodos estimularam a pesquisa de outros métodos, incluindo o método de

programação geométrica, o método da programação linear, e o método da programação não-linear [45], que não são abordados nesta dissertação.

Um problema básico de optimização pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\begin{array}{ll} \text{Minimizar (ou maximizar)} & f(X) \\ \text{Tal que} & \\ & g_j(X) \leq 0 \quad \text{para } j = 1, \dots, m \\ & X_i \geq 0 \quad \text{para } i = 1, \dots, n \end{array} \quad (3.20)$$

O objectivo de um problema de optimização é fazer com que o valor da função objectivo $f(X)$ seja tão pequeno (ou grande) quanto possível. As funções de restrições g_j definem um subespaço da variável de decisão X denominada região admissível. A solução óptima para o problema deve encontrar-se dentro da região admissível.

Nos problemas de síntese de tolerâncias, a maioria dos investigadores utiliza o custo de produção como a função objectivo, $C(t)$, e a variável de decisão é a tolerância (t). O objectivo é minimizar este custo, sujeito a um conjunto de restrições que consistem sobretudo na cadeia mínima de cotas, na capacidade do equipamento ou processo, e outras restrições relacionadas com pressupostos aplicados e com o método de optimização.

3.4.6.1 Métodos de síntese baseados na perda de qualidade

Na literatura encontra-se diversos métodos de síntese de tolerâncias com o objectivo de optimizar o custo total, que incorpora simultaneamente os custos de fabrico e os custos da perda de qualidade [28] [52]. O objectivo comum dos trabalhos publicados na literatura é o de determinar o conjunto de valores das tolerâncias dos componentes que conduz ao custo total mínimo. A função perda de qualidade transforma a degradação num custo para a sociedade que pode ser incluído numa função objectivo em conjunto com os custos de produção. O custo total CT é a soma dos custos de fabrico $C_i(t_i)$ e dos custos associados à perda de qualidade Cq_i , explicitada na equação (3.21).

$$CT = \sum_{i=1}^n C_i(t_i) + \sum_{i=1}^n Cq_i \quad (3.21)$$

A relação gráfica entre o custo total, o custo de fabrico e os custos associados à perda de qualidade representa-se graficamente na Figura 3.5.

A tolerância do conjunto T_{CONJ} deve respeitar uma ou mais restrições funcionais R_f :

$$T_{CONJ} \leq R_f \quad (3.22)$$

Segundo Umaras [53] pode-se apontar alguns pontos em comum na generalidade dos trabalhos que se focam na optimização simultânea dos custos de fabrico e dos custos da perda da qualidade, nomeadamente:

- Abordagem teórica, alterando apenas as equações dos custos empregues;
- Exemplos práticos;
- Considerações adicionais, específicas a cada exemplo de aplicação.

De uma forma geral, os modelos que se baseiam na perda de qualidade tratam o problema de alocação de tolerâncias de projecto sem considerar os processos de produção e a alocação de tolerâncias do processo. A função custo de produção baseia-se, em todo o trabalho revisto, num modelo genérico no qual o custo é uma função da tolerância de projecto. Nisto elas não consideram os processos de fabrico e a alocação de tolerâncias do processo. Estes métodos de alocação de tolerâncias não são simultâneos, mas sim usam um método tradicional, sequencial e iterativo.

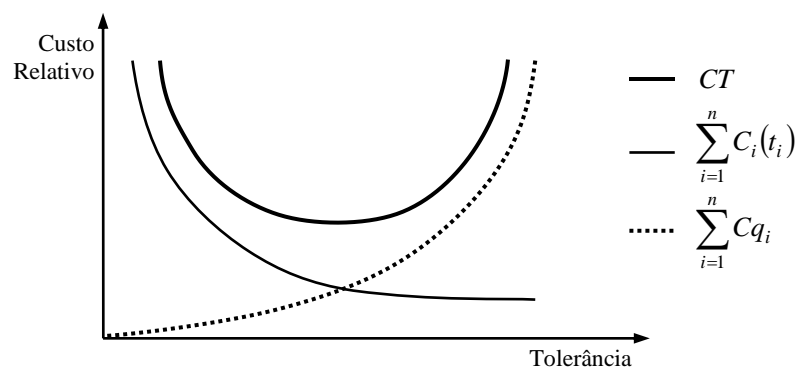


Figura 3.5 – Representação gráfica do custo total como soma do custo de fabrico e do custo da perda da qualidade, adaptado de [52].

A perda de qualidade é utilizada para limitar o alargamento das tolerâncias de projecto. Estes modelos tendem a alocar tolerâncias de projecto apertadas a cada dimensão do componente de forma a minimizar a perda de qualidade. O seu maior inconveniente é que eles não permitem partilhar a alocação de tolerâncias com fases mais avançadas do planeamento dos processos porque não consideram nem os processos produtivos nem a alocação de tolerâncias dos processos na alocação de tolerâncias do projecto. Se forem atribuídas tolerâncias excessivamente apertadas durante o projecto como resultado, o engenheiro de produção será forçado a solicitar alterações que irão aumentar o tempo de desenvolvimento do produto bem como um aumento da possibilidade de erro através da complicação de todo o processo de projecto.

3.5 Melhoria da qualidade por intermédio de técnicas de toleranciamento

Existem diversas técnicas que o engenheiro pode utilizar, que através de pequenas operações de acerto de tolerâncias possibilitam uma melhoria dos níveis de qualidade dos conjuntos mecânicos produzidos. Chase [48] apresenta três técnicas de toleranciamento que visam a redução do número de conjuntos rejeitados:

1. Centrar o valor médio da distribuição da montagem - Consiste no ajustamento das cotas nominais de um ou mais componentes, para que o valor médio da montagem possa ser deslocado para o centro, a igual distância do LSE e LIE. Esta técnica permite uma redução do número de conjuntos não-conformes e não obriga o alargamento ou aperto de tolerâncias, pois não estes afectariam o valor médio. Em casos em que é necessário alterar as cotas nominais de vários componentes deve-se utilizar um conjunto de factores, de forma a determinar que alterações devem ser feitas a cada componente;
2. Alinhar o valor médio com o limite superior ou inferior da especificação - Em casos de especificações unilaterais pode ser vantajoso proceder a um deslocamento da distribuição através da alteração das especificações;
3. Reduzir a dispersão da distribuição da montagem - Em processos centrados com elevadas taxas de rejeição devido a amplas dispersões, é necessário apertar as tolerâncias das dimensões de um ou mais componentes de forma a reduzir a variabilidade do conjunto mecânico.

4 Fundamentos da Teoria Axiomática de Projecto

4.1 Introdução

A Teoria Axiomática de projecto (TAP) foi expressa em livro por Suh em 1990 [54], mas desenvolvida desde os anos 70 do século XX, com o intuito de ser utilizada como um modelo sistemático para o ensino e para a prática da engenharia. A TAP constitui uma teoria de projecto de engenharia, sustentada em axiomas³, e que fornece uma base sistemática e científica para tomar decisões de projecto de forma a guiar a concretização de projectos bons.

Encontram-se na literatura exemplos da crescente utilização da TAP nas mais diversificadas áreas de projecto de engenharia. Tome-se como exemplo os trabalhos desenvolvidos por Suh [54] [55], Gonçalves-Coelho [56], Mourão *et al.* [57] [58] e Santos [59].

Neste capítulo apresentam-se os princípios da TAP, pois a sua aplicação na metodologia usada na presente dissertação permite uma decisão racional entre soluções e a verificação da qualidade do projecto de tolerâncias.

4.2 Os domínios de projecto

A finalidade de um produto é satisfazer uma necessidade do cliente e, para que haja uma concretização da necessidade, é essencial que o projecto forneça ao produto um conjunto de características às quais o mesmo deve obedecer.

De acordo com Benavides [60] na TAP, qualquer objecto de projecto, seja um produto, um processo ou qualquer outro sistema, pode ser descrito por um vector em cada um dos seguintes domínios, cuja relação se ilustra na Figura 4.1:

1. Domínio do cliente: Caracteriza-se pelas necessidades (ou atributos) que um cliente procura num produto, processo, sistema ou material. Os elementos neste domínio denominam-se necessidades do cliente (NC).
2. Domínio funcional: Caracteriza-se pelos requisitos funcionais (RF) ou pelos constrangimentos (CS), que representam os limites de uma solução aceitável. É uma reformulação das necessidades, ou a caracterização que o projectista faz das necessidades apontadas pelo cliente ao produto.

³ Axiomas são verdades assumidas sem prova, e a única forma de as refutar é encontrar um contra-exemplo, o que não é trivial.

3. Domínio físico: Caracteriza-se pelos parâmetros de projecto (PP). É uma reformulação dos requisitos funcionais em termos das realidades físicas que os podem satisfazer.
4. Domínio do processo: Caracteriza-se pelas variáveis de processo (VP). É uma reformulação dos parâmetros de projecto em termos dos processos que podem gerar as realidades físicas no domínio anterior.

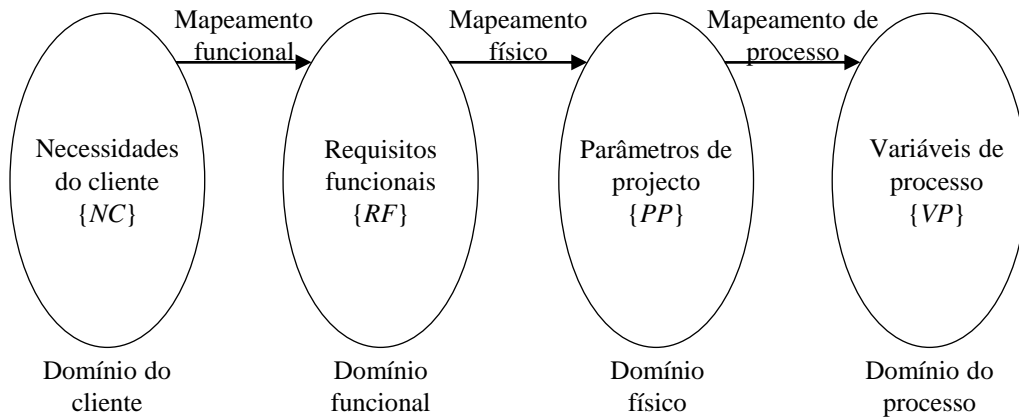


Figura 4.1 - O processo de mapeamento entre os domínios de projecto [54].

O processo de projecto inicia-se no domínio do cliente, onde se percepcionam as necessidades do cliente. O mapeamento funcional entre o domínio do cliente e o domínio funcional permite determinar os requisitos funcionais (RFs). Seguidamente, o mapeamento físico entre o domínio funcional e o domínio físico, expressa os RFs em PPs. Por fim, um mapeamento de processo entre o domínio físico e o domínio do processo resulta nas variáveis de processo (VPs) [57].

O mapeamento entre o domínio funcional e o domínio físico pode ser representado pela equação de projecto:

$$\{RF\} = [A]\{PP\} \quad (4.1)$$

onde $\{RF\}$ é o vector dos requisitos funcionais, de dimensão m , $\{PP\}$ é o vector dos parâmetros de projecto, de dimensão n , e $[A]$ é a matriz de transformação, ou matriz de projecto, de dimensão $m \times n$, cujos elementos são da forma [61]:

$$A_{ij} = \frac{\partial FR_i}{\partial DP_j} \quad i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \quad (4.2)$$

A equação (4.1) não é única, pois diferentes vectores $\{PP\}$ representam soluções de projecto diferentes, que se caracterizam por matrizes de projecto diferentes. Um conjunto específico de RFs pode ser satisfeito por diversos conjuntos de PPs, portanto, os projectistas devem focar-se em gerar várias soluções possíveis para o problema de projecto, e tentar

simultaneamente adoptar a melhor para desenvolvimento futuro. O conjunto de soluções viáveis inclui somente soluções que satisfaçam as restrições (CS) existentes, que são as restrições de projecto que afectam os RFs. Porém, pode verificar-se que as soluções determinadas como viáveis não são equivalentes. Nesta situação, é necessário um critério de decisão [56].

4.3 Axiomas

A TAP incorpora dois axiomas considerados como guias de desenvolvimento do projecto, que em conjunto com os constrangimentos limitam o conjunto de soluções aceitáveis, e a partir dos quais é possível definir algoritmos, que podem ser descritos em metodologias e métodos a partir dos quais são criadas as ferramentas para a sua aplicação [59].

4.3.1 Axioma da independência

A TAP afirma que boas soluções de projecto estão em conformidade com o axioma da independência.

Axioma da Independência: Manter a independência dos requisitos funcionais [54].

O axioma da independência determina que, num projecto aceitável, o mapeamento entre os RFs e os PPs permite que cada RF seja satisfeito sem afectar os restantes RFs. O axioma da independência permite classificar os projectos em três tipos distintos: desacoplados, desacopláveis e acoplados.

De acordo com a TAP, os projectos desacoplados são os preferíveis. Este tipo de projecto caracteriza-se por uma matriz de projecto diagonal, o que possibilita que cada PP satisfaça o RF correspondente, satisfazendo o axioma da independência. Os projectos desacopláveis caracterizam-se por apresentarem uma matriz de projecto triangular, o que os torna aceitáveis se a satisfação dos RFs for feita na ordem correcta; estes projectos podem ser tratados como desacoplados. Todas as outras formas de matriz de projecto correspondem a projecto acoplados, que devem ser evitados pois não existe uma sequência de PPs que satisfaça os RFs independentemente [58].

As soluções que violem a independência dos requisitos funcionais devem ser eliminadas no processo de projecto em prol daquelas que mantêm a independência. Por esta razão, este axioma limita o número de soluções a serem estudadas durante o projecto.

4.3.2 Axioma da informação

Do que se apresentou anteriormente é possível referir que existe a possibilidade de se lidar com duas ou mais soluções alternativas que sejam aceitáveis do ponto de vista do axioma da independência. Neste caso, o axioma da informação fornece meios quantitativos para avaliar as diversas opções.

Axioma da Informação: Minimizar o conteúdo de informação.

Esta definição torna possível estabelecer que o projecto com a maior probabilidade de satisfazer os requisitos funcionais é o melhor projecto [55].

O Axioma da Informação estabelece que o melhor projecto, daqueles que satisfazem o Axioma da Independência, é aquele que requer o mínimo conteúdo de informação para satisfazer os requisitos funcionais, portanto, os parâmetros de projecto que conduzam ao menor conteúdo de informação são os melhores [55].

No âmbito da TAP, a informação é uma medida que quantifica a complexidade de um projecto [54] e relaciona-se com a probabilidade de sucesso da solução. A complexidade do projecto prende-se apenas com o domínio funcional, e não com o domínio físico. Desta forma, a TAP permite comparar soluções de projecto com parâmetros físicos diferentes.

A probabilidade de num projecto com apenas um RF e um PP, o RF ser satisfeito é dada pela equação (4.3),

$$p = \frac{\text{Área de intersecção}}{\text{Área total}} \quad (4.3)$$

onde a “área total” é o integral da função densidade de probabilidade (f.d.p.) do RF, que por definição é igual a um, e a área de intersecção é a porção da “área total” que está localizada dentro do intervalo admissível de funcionamento (ver Figura 4.2) [57].

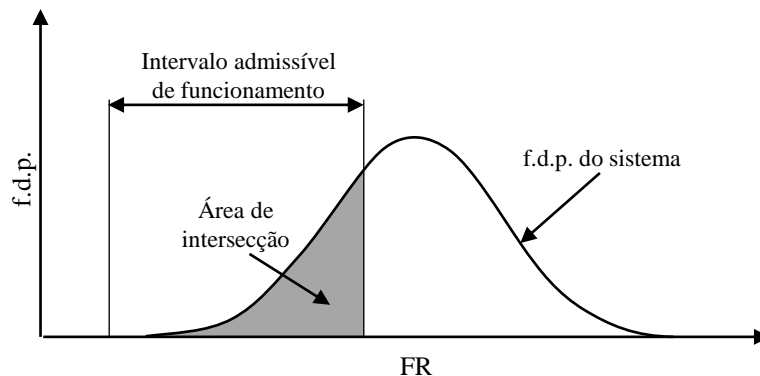


Figura 4.2 – Relação gráfica entre a f.d.p. do sistema e o intervalo admissível de funcionamento, adaptado de [59].

O conteúdo de informação define-se como o logaritmo do inverso da probabilidade de satisfazer o RF e para este caso é:

$$I = \log_x \left(\frac{1}{p} \right) = \log_x \left(\frac{1}{\text{Área de intersecção}} \right) \quad (4.4)$$

Por norma recorre-se a logaritmos de base 2, ficando o *bit* como unidade de informação.

Para um projecto desacoplado com n RFs, o conteúdo de informação total, I_t , pode ser computado através de:

$$I_t = \sum_{i=1}^n -\log_2 p_i = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (4.5)$$

onde p_i é a probabilidade do RF _{i} ser satisfeito pelo PP _{i} [56].

A aplicação do axioma da informação é de bastante utilidade no método proposto nesta dissertação. A sua utilização permite ao projectista determinar se, do ponto de vista do projecto, obteve uma solução melhor face à anterior, permitindo assim a comparação entre soluções disponíveis na síntese de tolerâncias.

4.4 A Teoria Axiomática de Projecto na gestão da qualidade

A generalidade dos métodos de gestão da qualidade actualmente em utilização tem uma natureza empírica e que se alicerça em critérios técnicos, sem uma base de projecto científica. Em situações que se verifique uma perda de satisfação do cliente relativamente a certos RFs de projecto, as abordagens tradicionais para resolução de problemas podem resultar numa solução insatisfatória, sobretudo para problemas de raiz conceptual. Nestes casos é necessária uma estratégia de qualidade axiomática que antecipe os problemas e proporcione meios para alcançar a solução, tanto a nível conceptual como operacional.

A maioria das metodologias de resolução de problemas focam-se em encontrar soluções para um RF problemático no ambiente de fabrico, recorrendo às VPs para melhorar a qualidade de um RF, contudo, não empregam mapeamentos de projecto ou princípios de projecto para obter ou validar a solução, ignorando possíveis vulnerabilidades do sistema. A título exemplificativo, a implementação da metodologia *6-Sigma*, abordada em §2.5, ignora o domínio físico (ver Figura 4.1), menosprezando a possível contribuição dos PPs para uma solução global.

Segundo El-Haik [62] o contorno do domínio físico para obtenção de soluções é acompanhado de dois grandes riscos:

- Introdução de alterações na produção quando não é necessário - ocorre quando se negligencia a necessidade de alterações de projecto em situações que o ajuste tradicional de VPs não se mostra suficiente para resolver o problema, sugerindo uma capacidade de solução limitada na produção;
- Introdução de novos sintomas noutros RFs quando se aplica a solução para o problema – advém do desconhecimento de acoplamentos, o que impede a obtenção de uma capacidade 6-Sigma.

Um dos motivos pelo qual se opta regularmente por utilizar um subconjunto das VPs para a solução é que, geralmente, é mais oneroso perseguir os PPs, pois este envolve tanto mudanças de projecto como de processo, enquanto o primeiro está limitado a alterações do processo apenas. Uma alteração pode ser suave (*soft*) ou árdua (*hard*). As alterações suaves compreendem o ajustamento do valor médio dos valores alvo (nominal) dentro das tolerâncias especificadas, a alteração dos intervalos de tolerância, ou ambas, enquanto as alterações árdas envolvem a eliminação ou adição de PPs ou VPs no mapeamento relevante. Num ambiente de produção, as alterações suaves do processo podem ser realizadas por ajustamento paramétrico no domínio dos PPs, dentro das tolerâncias permitas, enquanto as alterações árdas podem requerer uma alteração do vector {VP}. Quando as alterações suaves não produzam o resultado desejado é necessário recorrer a alterações árdas, que devem ser conduzidas através da designada qualidade axiomática [62].

Sejam os RFs em causa expressos matematicamente pela equação (4.1), os elementos da matriz de projecto, após diferenciação, expressos pela equação (4.2), e cada PP no vector {PP} escrito na forma de função de transferência $PP_j = g(VP_k)$, onde $VP_k, k = 1, \dots, n$, é um vector de variáveis de processo que são mapeados para PP_j . As alterações suaves podem ser implementadas utilizando as sensibilidades nos mapeamentos físico e do processo. Utilizando a regra de diferenciação em cadeia, tem-se

$$\frac{\partial RF_i}{\partial VP_k} = \frac{\partial RF_i}{\partial PP_j} \frac{\partial PP_j}{\partial VP_k} \quad (4.6)$$

onde o primeiro termo representa uma alteração de projecto e o segundo, uma alteração do processo. Uma estratégia eficiente de qualidade axiomática utiliza os dois termos quando é essencial utilizar todas as melhorias possíveis para obter uma solução 6-Sigma [62].

A qualidade axiomática é uma aplicação da TAP, com integração de conceitos da qualidade, focada em fornecer uma estrutura de solucionamento para as vulnerabilidades do projecto a fim de produzir com potencial de qualidade *Six-Sigma*. O objectivo principal da qualidade axiomática é projectar um sistema correctamente à primeira, por meio da eliminação ou redução de vulnerabilidades conceptuais ou operacionais, e através das seguintes orientações:

- O conceito de projecto deve ser abordado de numa perspectiva global, dependendo do uso extensivo de axiomas de projecto, engenharia da qualidade, e conceitos da metodologia *6-Sigma*;
- O objectivo é “projectar correctamente na primeira vez”;
- A optimização do projecto deve considerar as vulnerabilidades, conceptuais ou operacionais, e medidas económicas.

A aplicação da qualidade axiomática ocorre em três fases [62]:

1. Mapeamento funcional
2. Projecto conceptual para a capacidade
3. Optimização
 - a. Optimização de parâmetros
 - b. Optimização de tolerâncias
 - c. Fiabilidade axiomática

A fase de mapeamento funcional é similar àquela utilizada na Teoria Axiomática de projecto. Na fase de projecto conceptual para a capacidade define-se o potencial *6-Sigma* dos RFs. Nesta fase procura-se reduzir a vulnerabilidade de acoplamento dos requisitos funcionais de projecto, com o intuito de se obter uma capacidade de nível *6-Sigma*. Na fase de optimização procuram reduzir-se as vulnerabilidades operacionais, de forma a melhorar a robustez do produto através da definição de tolerâncias para os PPs e VPs, limitando os acoplamentos e complexidade do projecto, com o menor custo associado possível.

5 Metodologia de alocação adaptativa de tolerâncias com vista a ajustar o nível sigma da produção de sistemas mecânicos

5.1 Introdução

Uma síntese de tolerâncias racional deve sustentar-se de dados que caracterizem fidedignamente os processos utilizados na produção, contudo, a experiência mostra que a síntese de tolerâncias assenta em conhecimentos adquiridos pelos projectistas através da experiência, própria ou compilada em manuais, e que esta apoia-se frequentemente em informação inconsistente dos processos a utilizar [44]. Uma síntese de tolerâncias que não considere a capacidade dos processos de fabrico e que utilize campos de tolerâncias apertados para garantir a qualidade do produto estará, à partida, a submeter os processos de fabrico a especificações que estes terão dificuldade em cumprir, estimulando o aumento dos custos de produção.

A metodologia proposta surge da constatação que na literatura consultada, nas áreas da síntese de tolerâncias e da gestão da qualidade dos processos, existe uma lacuna de métodos que se foquem na optimização do projecto com vista a uma melhoria da qualidade dos processos, em fases avançadas da produção. Esta metodologia visa incentivar a flexibilização de tolerâncias especificadas na fase de projecto para que, quando solicitado pela gestão da qualidade dos processos, se proceda a uma realocação das tolerâncias atendendo às capacidades dos processos, computadas continuamente.

5.2 Propósito da metodologia

Uma ideia comum à generalidade dos métodos de alocação propostos na literatura, e perceptível nos trabalhos revistos na Secção §3.2, é a de que o conjunto de tolerâncias óptimas deve ser definido durante a fase de projecto. Os esforços realizados neste sentido focam-se, sobretudo, na obtenção e aplicação de modelos matemáticos que relacionem o custo de produção, o custo da perda de qualidade, ou ambos, com as tolerâncias especificadas. Qualquer método construído em torno desta ideia deve sustentar-se em pressupostos relativos à produção, antes do seu início, os quais se podem vir a verificar, durante a produção, de aplicabilidade limitada. A produção não tem natureza estática, as condições de fabrico alteram-se no decorrer

do tempo e é a gestão da qualidade dos processos que deve garantir que o comportamento dinâmico dos processos se mantém dentro dos limites especificados pelo projecto.

Em situações em que a produção de um conjunto mecânico envolva a produção dos diversos componentes em instalações independentes e que se verifique que existe desequilíbrio entre as capacidades dos processos de fabrico envolvidos, nem os responsáveis pela qualidade de cada processo, nem o departamento de projecto se aperceberão desta situação. Quando as técnicas de controlo da qualidade se mostram insuficientes para assegurar a produção consistente dentro dos limites das especificações, é frequente a tomada de decisões por parte dos responsáveis da qualidade, tendo em vista a melhoria do processo. De tal forma que, o aumento do esforço realizado pelo controlo da qualidade naquela unidade produtiva pode ser acompanhado por um aumento dos custos de produção, decorrente da necessidade de maior inspecção ou aquisição de equipamentos de melhor performance.

Propõe-se com esta metodologia, uma ferramenta complementar ao projecto de tolerâncias tradicional e que recorre à realocação das tolerâncias de um conjunto mecânico, para que estas reflectam as capacidades dos processos produtivos, durante o período de produção, e haja uma homogeneização da produtibilidade das tolerâncias. A aplicação desta metodologia permite, sem prejuízo da funcionalidade, um aproveitamento racional das capacidades dos processos, uma redução dos defeitos produzidos, uma melhoria da qualidade do produto e um aumento do desempenho do processo produtivo global (aumento do nível sigma global), através de uma adaptação das especificações de projecto (tolerâncias dimensionais) e sem qualquer intervenção nos processos de fabrico.

A síntese de tolerâncias deve, primeiramente, garantir que a funcionalidade do conjunto se mantém e, posteriormente reflectir as capacidades apresentadas pelos processos. As tolerâncias devem ser atribuídas com o intuito de uniformizar o esforço exigido aos processos, ou seja, deve-se alargar as tolerâncias dos processos com menor capacidade e apertar as tolerâncias dos processos com maior capacidade. Esta acção é realizada de uma forma racional sustentada por informação confiável e actualizada dos processos.

Acredita-se que a metodologia apresentada é a primeira tentativa conhecida que propõe a comunicação entre o projecto e o controlo da qualidade dos processos, durante a fase de produção, para que haja uma melhor percepção da capacidade de cada processo envolvido, e uma acção correctiva sobre as tolerâncias mais atempada e efectiva, no sentido de nivelar os esforços exigidos aos recursos existentes, gerindo as dificuldades sentidas na produção através da melhoria do projecto de tolerâncias.

A metodologia de projecto dinâmico de tolerâncias dimensionais com dados do controlo estatístico dos processos de fabrico incorpora princípios e conceitos de três áreas:

1. Toleranciamento de sistemas mecânicos – O toleranciamento tem um grande impacto na montagem, no custo de produção e na qualidade funcional do produto. A utilização de métodos de síntese de tolerâncias garante a funcionalidade do conjunto mecânico através de uma alocação racional de tolerâncias.
2. Gestão da qualidade dos processos – A utilização de ferramentas do SPC permite perceber e comparar as capacidades efectivas dos processos de fabrico empregues.
3. Teoria Axiomática de Projecto – A metodologia sugere uma optimização do projecto de tolerâncias. A aplicação da Teoria Axiomática de projecto visa garantir que as alterações efectuadas conduzem a um projecto melhor.

5.3 Considerações à aplicação da metodologia

Para aplicação da metodologia devem observar-se os seguintes pressupostos, que na sua maioria são consistentes com os pressupostos adoptados pela literatura da especialidade e que, segundo a qual, não são particularmente onerosos.

1. A função de projecto é assumida como unidimensional;
2. A tolerância funcional de uma dada cadeia de cotas é dada;
3. As dimensões numa cadeia de cotas e os processos para obter cada dimensão, são independentes;
4. Apenas as tolerâncias dimensionais são alvo de tratamento;
5. Os processos estão sob controlo estatístico;
6. A informação proveniente do controlo estatístico dos processos deve ser fiável e actualizada;
7. Os processos podem ser modelados por uma distribuição Normal;
8. Os processos devem ser considerados capazes ($C_{pk} \geq 1,33$);
9. Qualquer melhoria da qualidade dos processos só será conseguida através da redução da sua variabilidade, recorrendo a modificações que acarretam custos directos (por exemplo: aquisição de equipamento);
10. O conjunto mecânico destina-se a produção em massa;
11. A solução de projecto óptima é alcançada através do nivelamento das capacidades dos diferentes processos de fabrico.

A observação do pressuposto da independência dos processos de fabrico permite escrever a equação de projecto (5.1), que representa o cumprimento das tolerâncias

especificadas pelo projecto pelo respectivo processo de fabrico, para cada componente. Assim, apesar da síntese de tolerâncias ser acoplada, há independência das tolerâncias do ponto de vista da produção, o que irá permitir o cálculo do conteúdo de informação de cada processo e do processo produtivo global.

$$\begin{Bmatrix} \text{Tolerância}_1 \\ \text{Tolerância}_2 \\ \dots \\ \text{Tolerância}_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & \dots & 0 \\ 0 & X & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{Processo de Fabrico}_1 \\ \text{Processo de Fabrico}_2 \\ \dots \\ \text{Processo de Fabrico}_n \end{Bmatrix} \quad (5.1)$$

Estes pressupostos são apresentados por três motivos:

- Simplificação da formulação e implementação do método;
- Delimitação da abrangência do método, de forma a limitar a complexidade da aplicação do método e facilitar a sua demonstração;
- Incorporação da Teoria Axiomática de Projecto.

5.4 Metodologia de projecto dinâmico de tolerâncias através de dados do SPC

A metodologia proposta utiliza novos canais de informação e procedimentos, para além dos já existentes. A sua aplicação ocorre em simultâneo com a fase de produção, atendendo aos pressupostos apresentados em §5.3, para que a sua aplicação seja correcta. A metodologia está segmentada nas etapas apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Etapas de aplicação da metodologia e integração no projecto e produção.

1	Estudo funcional do sistema.	PROJECTO
2	Dimensionamento funcional.	
3	Comunicação dos desenhos técnicos a cada processo.	
4	Recolha de dados do SPC.	PRODUÇÃO
5	Análise da capacidade dos processos.	
6	Comunicação dos dados recolhidos ao departamento de projecto.	OPTIMIZAÇÃO DO PROJECTO
7	Tratamento dos dados da produção.	
8	Aplicação da Teoria Axiomática de Projecto.	
9	Realocação de tolerâncias.	
10	Comunicação das alterações de projecto aos processos visados.	

O método proposto encontra-se esquematizado com maior detalhe no fluxograma da Figura 5.1. Na fase inicial recorre-se à abordagem tradicional do projecto. Deve realizar-se um estudo funcional do sistema para a síntese de tolerâncias inicial. As tolerâncias de cada dimensão (t_i) devem ser incluídas nos desenhos técnicos enviados às respectivas instalações de fabrico. Desta forma, pode-se dar início ao planeamento dos processos e à produção.

A segunda fase compreende a aquisição e tratamento dos dados obtidos de cada processo, através do SPC, durante a produção. O tratamento dos dados inclui o estudo da Normalidade dos dados obtidos, condição fundamental para modelar o processo através de uma distribuição Normal $N(\mu, \sigma^2)$, e consequente estudo da capacidade de cada processo, de onde resultam os índices de capacidade do processo (C_p e C_{pk}) e a probabilidade não-conforme de cada processo (p_{fi}).

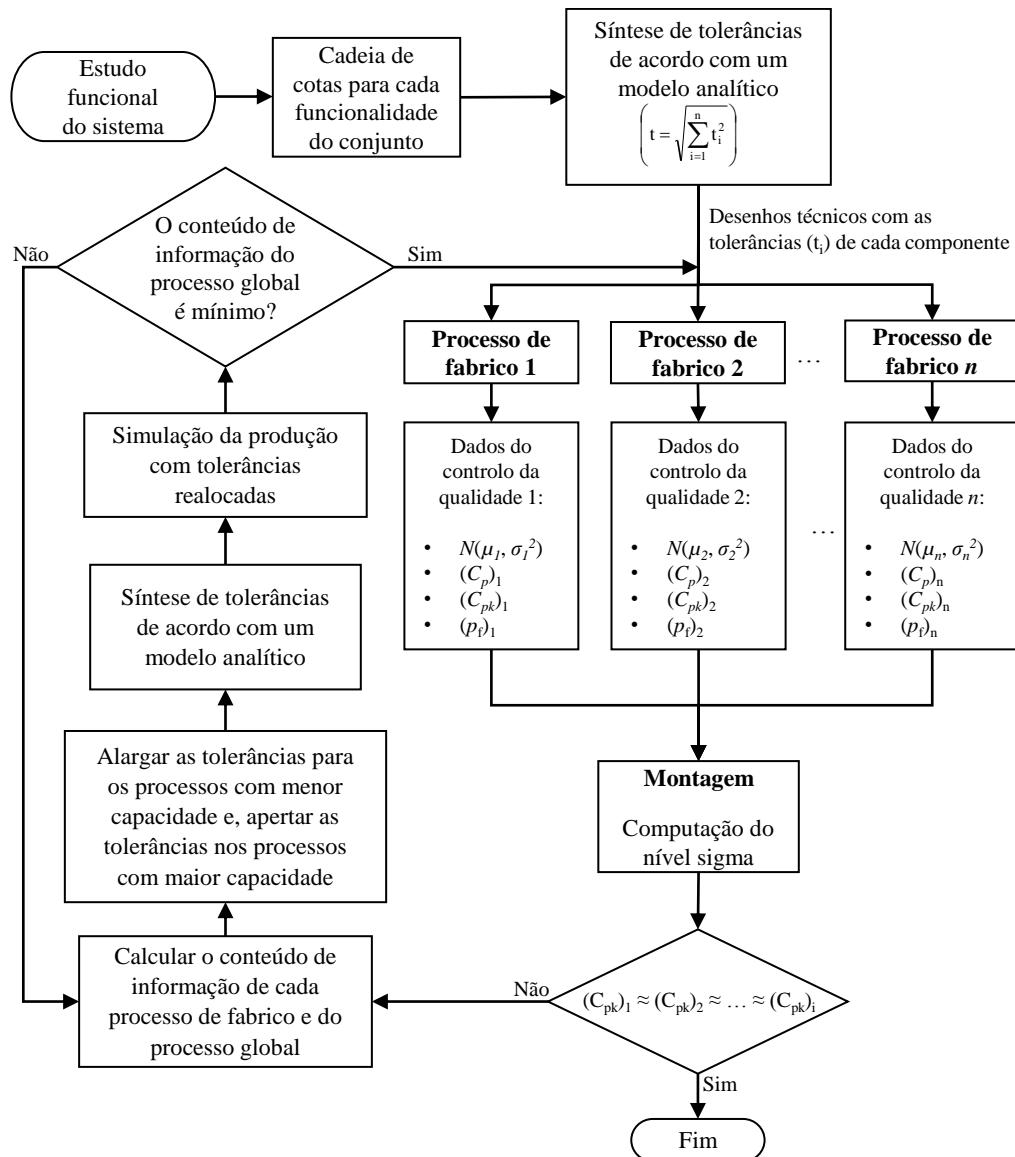


Figura 5.1 - Fluxograma da metodologia proposta.

Na terceira fase, o departamento de projecto deve empregar as competências propostas pela metodologia. Neste sentido, deve analisar os dados enviados pelo controlo da qualidade de cada processo. Com estes dados, o departamento de projecto pode estimar o número de conjuntos defeituosos produzidos, que é uma função da probabilidade não-conforme de todo o processo produtivo (p_{f_Total}). O número de conjuntos defeituosos por milhão de conjuntos produzidos (DPMO) permite ter conhecimento aproximado dos custos associados à perda de qualidade, nomeadamente com custo de retrabalho das peças. A probabilidade não-conforme de todo o processo produtivo é uma função das probabilidades não-conforme de cada processo. A probabilidade de cada tolerância de projecto ser satisfeita pelo respectivo processo de fabrico, p_i , permite calcular o conteúdo de informação (I) da solução de projecto inicial. Na montagem é possível confirmar o nível sigma de todo o processo produtivo. O nível sigma de todo o processo produtivo (produção e montagem) é uma medida do nível de dispersão do processo e utilizado como indicador do nível de desempenho do processo produtivo.

O departamento de projecto pode avançar com a aplicação da metodologia quando:

1. Os responsáveis do controlo da qualidade de um processo solicitem alteração da produção devido à baixa capacidade do mesmo;
2. O projecto verifique que existe uma disparidade considerável entre as capacidades dos vários processos ou que, o nível sigma exigido não é observado.

A observação de um nível sigma abaixo do pretendido pode ter como causas as disparidades entre as capacidades dos vários processos envolvidos no fabrico de um conjunto mecânico, a ocorrência de um processo com baixa capacidade ou variabilidade excessiva dos processos. No primeiro caso, verifica-se que ao existir um processo com uma capacidade significativamente inferior à dos outros processos envolvidos, a qualidade de todo o processo produtivo será afectada negativamente. O nivelamento da capacidade dos processos é uma acção preferível à existência de capacidades dos processos muito díspares. Este nivelamento das capacidades dos processos corresponde à homogeneização do esforço exigido aos processos.

O conhecimento em pormenor da capacidade dos processos permite alterar as tolerâncias de projecto, que se considerem necessárias, de forma a reduzir a contribuição exigida a um processo com capacidade inferior e a aumentar a contribuição exigida a um processo com capacidade superior. A realocação de tolerâncias começa com o alargamento das tolerâncias atribuídas a processos com capacidade inferior e aperto das tolerâncias atribuídas a processos com capacidade superior à média. A síntese de tolerâncias deve utilizar sempre um modelo analítico, de forma a garantir a funcionalidade do conjunto mecânico. Posteriormente, deve realizar-se uma simulação da produção, utilizando os dados provenientes do SPC, para verificar a melhoria de desempenho da produção com as tolerâncias alteradas. A solução óptima estará determinada quando se conseguir o valor mínimo do conteúdo de informação, garantindo

também, que se está perante a melhor solução de projecto do ponto de vista da Teoria Axiomática. Deve-se ter em atenção que as tolerâncias constituintes da solução óptima não podem implicar a alteração ou substituição dos processos de fabrico.

O método deve ser interpretado como uma ferramenta complementar e de grande potencial, no sentido de reduzir as dificuldades sentidas pelos processos para produzir dentro das especificações de projecto, e não como um afastamento das abordagens típicas do controlo e melhoria da qualidade ou um meio de evitar a optimização de processos de fabrico de baixa capacidade.

Grupos empresariais com várias unidades produtivas e que são responsáveis por grandes produções devem prestar mais atenção ao intercâmbio de dados entre o departamento de projecto e os departamentos de gestão da qualidade das unidades produtivas envolvidas.

Este método diferencia-se dos restantes encontrados na literatura por:

- Permitir uma reatribuição de tolerâncias após a fase de projecto (durante a produção);
- Utilizar dados actualizados dos processos;
- Permitir a incorporação de outros métodos de síntese de tolerâncias, desde que sejam sensíveis à natureza estatística dos processos;
- Permitir uma avaliação contínua das tolerâncias atribuídas;
- Recorrer a uma uniformização das capacidades dos processos para melhorar a qualidade do produto.

5.5 Aplicação de apoio à metodologia

Com o intuito de auxiliar o tratamento de dados do SPC e agilizar o processo iterativo de síntese das tolerâncias óptimas criou-se uma aplicação em linguagem *Matlab*[®]. Esta aplicação permite aos responsáveis pelo projecto obter um conjunto de tolerâncias óptimas para os componentes do conjunto mecânico, através da metodologia apresentada, recorrendo à informação recolhida pelo controlo da qualidade dos processos.

O fluxograma da Figura 5.2 ilustra a rotina utilizada para obter o conjunto de tolerâncias óptimas. A aplicação inicia-se com a introdução dos dados recolhidos pela gestão da qualidade dos processos e pelas especificações de projecto. Com esta informação a aplicação realiza um estudo da capacidade dos processos responsáveis pela produção dos diversos componentes. Com os dados resultantes, a aplicação calcula os conteúdos de informação e o nível sigma iniciais.

No caso das capacidades dos processos serem dispare, a aplicação inicia uma rotina de na qual reatribui as tolerâncias (atendendo a um modelo analítico e à especificação inicial) e simula a produção com as novas tolerâncias. Quando for identificado o conjunto de tolerâncias que nivela a capacidade dos processos, maximiza o nível sigma e mínima o conteúdo de informação, a aplicação devolve o conjunto de tolerâncias alteradas.

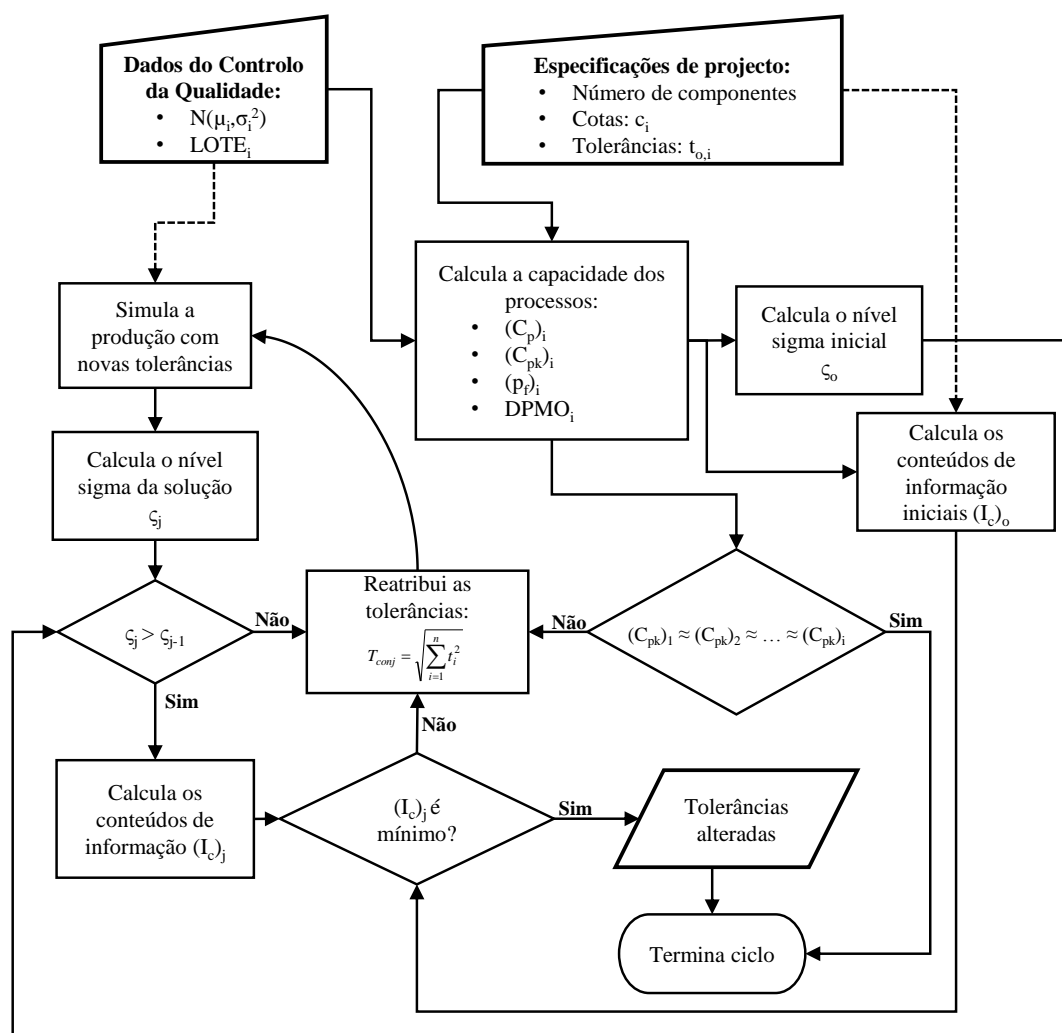


Figura 5.2 - Fluxograma da aplicação auxiliar.

6 Aplicação da metodologia na produção em série de um conjunto mecânico

6.1 Caracterização do problema

Neste capítulo aplica-se a metodologia desenvolvida no §Capítulo 5 a um caso de estudo. O caso de estudo foi concebido com o objectivo de apresentar as vantagens da utilização da metodologia proposta. No caso de estudo a analisar, uma organização é responsável pelo projecto e produção de um produto. O produto é um conjunto mecânico constituído por três componentes (ver Figura 6.1). Para efeitos de aplicação do método, apenas as cotas e tolerâncias na direcção horizontal serão consideradas.

A organização tem à sua disposição um gabinete de projecto e quatro instalações fabris independentes, que asseguram a produção e montagem dos componentes. Cada instalação é responsável pela produção em série de apenas um dos três componentes. A montagem do conjunto mecânico estará a cargo da quarta instalação. Cada instalação actuará autonomamente no planeamento dos processos e escolha de fornecedores.

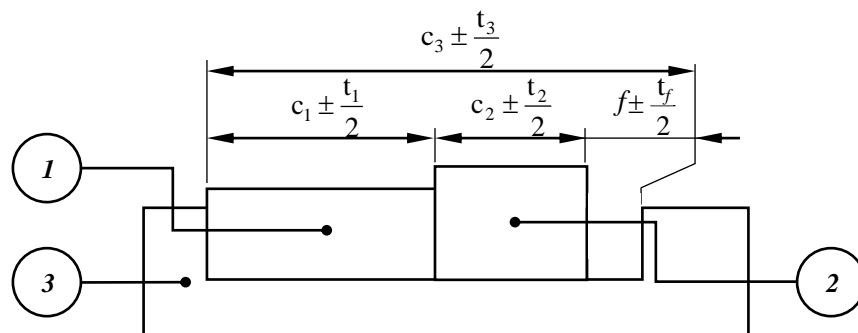


Figura 6.1 - Conjunto funcional em estudo.

Os responsáveis pelo projecto verificaram que, para garantir a funcionalidade do conjunto, após a montagem dos componentes deverá existir uma folga, f . A folga e a respectiva tolerância (t_f) são especificadas como $0,5 \pm 0,04$ [mm]. Na Tabela 6.1 apresentam-se as cotas funcionais dos três componentes, especificadas pelo projecto.

Tabela 6.1 – Valores das cotas funcionais.	
Cota funcional, c_i	Valor [mm]
c_1	65
c_2	24,5
c_3	90

Aquando da definição das tolerâncias dos três componentes, o departamento de projecto não recorreu a informação proveniente do controlo da qualidade das fábricas, por esta não se encontrar disponível.

6.2 Definição de tolerâncias por um procedimento tradicional

Atendendo à falta de acesso a informação da produção, o gabinete de projecto optou por fazer uma síntese de tolerâncias de acordo com um método analítico e recorrer às tabelas da norma ISO 286 para fixação de tolerâncias [63]. Na Tabela 6.2 apresentam-se valores dos graus de tolerância internacionais para as cotas nominais dos três componentes e os valores da tolerância da folga, obtidos através do modelo estatístico simples, utilizando a equação (3.8), para cada conjunto de tolerâncias normalizadas. O facto de se utilizar o mesmo grau IT permite que o nível de precisão exigida seja equivalente para todas as cotas nominais dos componentes.

Tabela 6.2 – Tolerâncias (qualidade IT) e tolerância da folga (t_f) obtida por cada conjunto de tolerâncias.

c_i [mm]	t_i (mm)			
	IT6	IT7	IT8	IT9
65	0,019	0,030	0,046	0,074
24,5	0,013	0,021	0,033	0,052
90	0,022	0,035	0,054	0,087
t_f [mm]	0,032	0,051	0,078	0,126

Do conjunto de folgas da tolerância obtidas, verifica-se que aquela que cumpre a tolerância da folga especificada, igual a 0,08 mm, e que utiliza melhor a tolerância da folga é o conjunto de tolerâncias normalizadas IT8. Na Tabela 6.3 apresentam-se as cotas nominais com as respectivas tolerâncias e as cotas, mínima e máxima, admissíveis. Os valores da Tabela 6.3 foram enviados às respectivas instalações fabris, através dos desenhos técnicos.

Tabela 6.3 - Cotas nominais e tolerâncias inicialmente especificadas pelo projecto.

Cota funcional	Cota nominal [mm]	Tolerância [mm]	C_{\min} [mm]	C_{\max} [mm]
c_1	65	0,046	64,977	65,023
c_2	24,5	0,033	24,484	24,517
c_3	90	0,054	89,973	90,027

Durante a produção, a gestão da qualidade de cada processo é responsável por garantir que as peças produzidas cumprem as especificações de projecto e que os processos são considerados capazes, de acordo com o que foi apresentado na secção §2.4. É necessário relembrar que não existe troca de informação entre instalações, ou entre responsáveis da

qualidade dos processos de fabrico e o departamento de projecto. No decorrer da produção, os responsáveis pelos processos recorrem a técnicas da gestão da qualidade, incluindo o SPC, de forma a melhorar a capacidade dos processos.

Durante uma fase intermédia da produção e até à qual, foram produzidos 10000 conjuntos, e cada processo foi melhorado, recorrendo a técnicas da qualidade, de forma que estes apresentem a maior capacidade possível, os dados recolhidos e tratados por cada controlo da qualidade apresentam-se na Tabela 6.4. Os valores das características críticas para a qualidade podem ser modelados por uma distribuição Normal. Os dados compreendem o valor médio, o desvio padrão da distribuição, e os índices de capacidade do processo C_p e C_{pk} , obtidos de acordo com as equações (2.6) e (2.10), respectivamente.

Tabela 6.4 – Dados provenientes do controlo da qualidade de cada processo de fabrico.				
Processo (Dimensão)	Valor médio [mm]	Desvio padrão [mm]	C_p	C_{pk}
1 (65 mm)	65,000	0,0055	1,38	1,38
2 (24,5 mm)	24,500	0,0034	1,62	1,62
3 (90 mm)	90,000	0,0050	1,77	1,77

Uma análise dos dados da Tabela 6.4 permite verificar que apesar dos processos de fabrico serem considerados capazes, existe uma disparidade das capacidades de cada processo. O processo responsável pela produção do componente 1 apresenta menor capacidade que os restantes processos, portanto, tem uma maior dificuldade em produzir dentro das especificações que os restantes processos. Pode-se verificar também que os processos estão a operar centrados, portanto, qualquer melhoria da sua capacidade resultará apenas de uma redução da variabilidade natural de cada processo, o que acarreta custos, nomeadamente, com a aquisição de equipamento com melhor performance.

Para se ter uma ideia mais precisa a que correspondem estes valores em termos de defeitos produzidos, apresenta-se na Tabela 6.5 as probabilidades não-conforme e DPMO de cada processo de fabrico. Apresenta-se também o nível sigma do processo produtivo global (conjunto dos processos responsáveis pela produção dos componentes e pela montagem).

Tabela 6.5 – Probabilidade não-conforme e DPMO de cada processo de fabrico.			
Processo	Probabilidade não-conforme	DPMO	Nível Sigma
1	3,45e-05	34,5	
2	5,97e-07	0,59	
3	1,08e-07	0,10	
Global	3,46e-05	35,2	5,47

Embora o processo global apresente um nível sigma próximo de 6, a maior dificuldade para produzir consistentemente dentro das especificações, apresentada pelo processo 1, reflecte-se no número elevado de DPMO do processo global. Por outro lado, qualquer aumento do nível

sigma do processo global através da melhoria nos processos 2 e 3, o que aumentará os custos, estará limitado pela inferior capacidade do processo 1.

6.3 Utilização da metodologia proposta

De acordo com a metodologia proposta, é de todo o interesse a partilha contínua de informação recolhida, através do SPC, através de canais de informação adicionais com o departamento de projecto da organização. Com esta informação é possível identificar situações em que as tolerâncias definidas em projecto estão a provocar dificuldades dispensáveis na produção, e actuar atempadamente nas especificações de projecto para todas as operações de produção, através de um ajustamento racional.

No caso em estudo, o processo responsável pela produção do componente 1 apresenta maior dificuldade em produzir dentro das especificações enquanto o processo responsável pela produção do componente 3 tem menor dificuldade em produzir dentro das especificações impostas. Uma constatação desta natureza, por parte do projecto, sugere o emprego da metodologia, reduzindo a tolerância da dimensão c_3 de modo a possibilitar o aumento da tolerância da dimensão c_1 .

Como ponto de partida, deve-se determinar o conteúdo de informação, I_c , da solução de projecto inicial, ou seja, com o conjunto de tolerâncias inicialmente especificados. Atendendo a que os processos seguem uma distribuição Normal, o conteúdo de informação para cada solução de projecto é obtido através da equação (4.5). O conteúdo de informação para a abordagem tradicional é de $4,99 \times 10^{-5} \text{ bit}$.

A obtenção do conjunto de tolerâncias que conduz ao menor conteúdo de informação do sistema é um processo iterativo, de acordo com o método proposto na secção 5.4. A procura do conjunto de tolerâncias que minimiza o conteúdo de informação da solução, e paralelamente reduz o número de defeitos produzidos, conduzindo a um aumento do nível sigma, deve seguir o método estatístico simples.

Na Tabela 6.6 apresenta-se o resultado do processo de computação para realocação de tolerâncias, de acordo com a Figura 5.1, e que satisfaz a folga imposta por projecto.

Tabela 6.6 - Cotas nominais e tolerâncias (Caso inicial após intervenção)

Cota funcional	Cota nominal (mm)	Tolerância (mm)	C_{\min} (mm)	C_{\max} (mm)
c_1	65,000	0,055 [\uparrow]	64,972	65,028
c_2	24,500	0,034 [\uparrow]	24,483	24,517
c_3	90,000	0,047 [\downarrow]	89,977	90,024

Através da simulação da produção com as tolerâncias alteradas e do estudo da capacidade dos processos, realizados com o auxílio da aplicação proposta na secção § 5.5, resultaram os valores apresentados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Índices de capacidade, DPMO e nível sigma (Caso inicial após intervenção).

Processo	C_p	C_{pk}	Probabilidade não-conforme	DPMO	Nível Sigma
1	1,67	1,67	4,81e-07	0,48	
2	1,71	1,71	1,75e-07	0,18	
3	1,69	1,69	4,45e-07	0,45	
Global			1,10e-06	1,10	6,23

Como se pode confirmar, um ajustamento nas tolerâncias t_1 e t_3 permitiu que a capacidade do processo 1 aumentasse e, apesar de se verificar uma redução da capacidade do processo 3, o nivelamento dos índices de capacidade resultou num aumento do nível sigma de todo o processo produtivo, de 6,23 ao invés de 5,48, o que significa um aumento de 13,7%.

Este aumento do nível sigma do processo produtivo global indica ainda que, do ponto de vista estatístico, se alcançou uma solução em que a variabilidade da dimensão da folga especificada é menor do que na situação inicial. Portanto, pode concluir-se que o custo de perda de qualidade será menor do que na situação inicial. Apesar de se ter reduzido a capacidade do processo 3, por via de projecto, e paralelamente induzido maiores custos de controlo da qualidade, o aumento destes custos no processo é balanceado com uma redução superior dos custos de perda da qualidade no processo global.

A utilização da metodologia resultou numa solução com um conteúdo de informação de $1,59 \times 10^{-6}$ bit, portanto, inferior ao inicial e evidenciando que também se obteve uma solução melhor do ponto de vista do projecto.

7 Conclusão

Nos capítulos iniciais desta dissertação apresentaram-se os resultados da revisão da literatura, considerados relevantes. Nesta revisão da literatura apresentou-se parte da investigação efectuada sobre a análise da capacidade do processo, índices de capacidade do processo, métodos de síntese de tolerâncias e Teoria Axiomática de Projecto.

O controlo estatístico do processo é uma ferramenta utilizada nos processos produtivos, pela gestão da qualidade, com o objectivo de fornecer informações para que seja possível adoptar estratégias que visem o aumento da produtividade. Esta ferramenta apresenta-se também de grande utilidade para o projecto de tolerâncias pois consegue munir os responsáveis de projecto de informação relevante sobre os processos de fabrico utilizados.

A investigação dos métodos de síntese de tolerâncias, apresentados no capítulo 3, permitiu chegar a três conclusões relevantes:

- 1) Os métodos tradicionais viabilizam uma síntese de tolerâncias que pode provocar um desnivelamento acentuado das capacidades dos processos de fabrico utilizados.
- 2) Apenas os métodos que utilizam técnicas de optimização recorrem à capacidade dos processos de fabrico como restrição na atribuição de tolerâncias. Estes métodos são sobretudo métodos académicos que perseguem curvas custo-tolerância que são geralmente inacessíveis ou de difícil acesso, tornando estes métodos de utilização prática limitada.
- 3) Os métodos investigados não equacionam a alteração das tolerâncias especificadas inicialmente, com o propósito de actuar directamente na capacidade dos processos e melhorar a qualidade do produto.

Nesta dissertação propôs-se uma metodologia de projecto dinâmico de tolerâncias. A metodologia apresentada realiza uma síntese de tolerâncias, na qual as tolerâncias são atribuídas dinamicamente de acordo com as capacidades dos vários processos de fabrico, alargando as tolerâncias dos processos com capacidade inferior e apertando as tolerâncias dos processos que tenham uma capacidade superior, durante a produção em série de conjuntos mecânicos. Esta metodologia possibilita uma alteração das tolerâncias especificadas inicialmente para que se alcance um nivelamento das capacidades dos processos, sem qualquer modificação de melhoria nos processos. O conjunto de tolerâncias seleccionado deve maximizar o nível sigma e minimizar simultaneamente o conteúdo de informação do projecto.

Os resultados da utilização da metodologia, apresentados no capítulo §6, mostram que a sua incorporação no relacionamento entre o projecto e a gestão da qualidade de cada processo resulta na uniformização dos esforços relativos solicitados a cada processo, na diminuição do número de defeitos produzidos, num aumento nível sigma global e num aumento da qualidade dos produtos, fruto da redução da variação das dimensões críticas por via do projecto e sem alteração dos processos.

A metodologia de projecto dinâmico de tolerâncias através de dados do controlo estatístico dos processos de fabrico apresenta as seguintes vantagens de aplicação:

- Permite ao gabinete de projecto manter um conhecimento contínuo das capacidades dos processos, durante a fase produção;
- Permite um aumento do nível sigma do processo produtivo global;
- Permite obter soluções melhores do ponto de vista do projecto;
- Não impõe modificações nos processos;
- Possibilita a obtenção de um produto final de qualidade superior.

É importante referir que as considerações à aplicação da metodologia, apresentadas na secção §5.3, foram definidas com o intuito de garantir maior simplicidade de formulação e facilidade de implementação do método, o que permitiu restringir a abrangência do método, de modo a limitar a complexidade da aplicação do método e facilitar a sua demonstração. A metodologia permite uma utilização mais abrangente do que aquela apresentada portanto, é aceitável que não se verifiquem todos os pressupostos (p. ex. podem ser tratadas tolerâncias geométricas ou processos modelados por distribuições que não a Normal), à excepção daqueles que garantem tanto a fiabilidade dos dados recolhidos nos processos e como a necessidade de actuação sobre o projecto de tolerâncias.

Como trabalho futuro, seria de todo o interesse conseguir aplicar a metodologia proposta a situações de produção real, o que certamente permitira mostrar aos responsáveis pelo projecto de conjuntos mecânicos destinados a grandes produções como uma modificação dos procedimentos usuais no projecto de tolerâncias e da gestão da qualidade, como a que se sugere, poderá verificar-se vantajosa. Por outro lado, uma aplicação prática da metodologia possibilitaria tornar a metodologia robusta a processos que sejam modelados por distribuições distintas da Normal e portanto, a uma complexidade superior. Por fim, uma análise da influência das limitações naturais dos instrumentos de medição, utilizados na recolha dos dados do controlo estatístico dos processos, poderá constituir material de desenvolvimento da metodologia proposta.

Bibliografia

- [1] Z. L. Pereira e J. G. Requeijo, *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, Caparica: FFCT, 2008.
- [2] D. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, Nova Iorque: John Wiley & Sons, Inc., 5ª Edição, 2009.
- [3] J. S. Oakland, *Statistical Process Control*, 5ª Edição, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
- [4] E. Dietrich e A. Schulze, *Guidelines for the evaluation of measurement systems and processes, for acceptance of production facilities: with original guidelines from Ford, General Motors and Daimler-Benz*, Munchen, Wien: Hanser, 1998.
- [5] T. P. Ryan, *Statistical Methods for Quality Improvement*, 3ª Edição, Smyrna, Georgia: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [6] S. Steiner, B. Abraham e J. MacKay, “Understanding Process Capability Indices” *IIQP Research Report no.2*, 1997.
- [7] V. E. Kane, “Process Capability Indices,” *Journal of Quality Technology*, pp. 41-53, 1986.
- [8] K. G. Khadse e R. L. Shinde, “Probability-Based Process Capability Indices,” *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, pp. 884-904, 2009.
- [9] S. Kotz e N. L. Johnson, *Process Capability Indices*, Suffolk: Chapman & Hall, 1993.
- [10] L. Chan, S. Cheng e F. Spiring, “A new measure of process capability, Cpm,” *Journal of Quality Technology*, pp. 160-175, 1988.
- [11] T. Hsiang e G. Taguchi, “A Tutorial on Quality Control and Assurance - The Taguchi Methods,” em *American Statistical Association's Annual Meeting*, Las Vegas, Nevada, 1985.
- [12] W. L. Pearn, S. Kotz e N. L. Johnson, “Distributional and Inferential Properties of Process Capability Indices,” *Journal of Quality Technology*, pp. 216-231, 1992.
- [13] A. Luceño, “A Process Capability Ration with Reliable Confidence Intervals,” *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, pp. 235-246, 1996.

- [14] S. Kotz e C. R. Lovelace, *Process Capability Indices in Theory and Practice*, Londres: Arnold, 1998.
- [15] M. Perakis e E. Xekalaki, "A process capability index that is based on the proportion of conformance," *Journal of Statistical Computation and Simulation*, pp. 707-718, 2002.
- [16] S. Kotz e N. L. Johnson, *Process Capability Indices – A review*, Londres: Chapman & Hall, 2002.
- [17] S. Somerville e D. C. Montgomery, "Process capability indices and non-normal distributions," *Quality Engineering*, v.9, n.2, pp. 305-316, 1996.
- [18] P. U. Gonçalves e L. Werner, "Comparação dos índices de capacidade do processo para distribuições não-normais," *Gestão da Produção*, v.16, pp. 121-132, 2009.
- [19] J. Juran e F. M. Gryna, *Juran's Quality Control Handbook*, 4ª Edição, Nova Iorque: McGraw-Hill, 1988.
- [20] A. M. Lucca, K. N. Berti e D. C. Cervený, "Statistical tolerance allocation in design utilizing historical supplier process data," em *Advances in Electronic Packaging: apresentado na The 1995 International Intersociety Electronic Packaging Conference - INTERpack '95 Part 1.*, 1995.
- [21] King, "Collecting and developing manufacturing process capability models," em *Dimensioning and Tolerancing Handbook*, McGraw-Hill, 1999, pp. 17.1-17.11.
- [22] M. M. Tata e A. C. Thornton, "Process capability database usage in industry: myth vs. reality," em *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Las Vegas, Nevada, 1999.
- [23] K. D. Delaney e P. Phelan, "Design improvement using process capability data," *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 619-624, 2009.
- [24] K. Yang e B. El-Haik, *Design for Six-Sigma: A Roadmap for Product Development*, Nova Iorque: McGraw-Hill, 2003.
- [25] D. R. Bothe, "Statistical Reason for the 1.5 σ Shift," *Quality Engineering*, pp. 479-487, 2002.
- [26] J. R. Evans e W. M. Lindsay, *Managing Quality and Performance Excellence*, Mason: Thomson Press, 2008.
- [27] G. Taguchi, E. Elsayed e T. Hsiang, *Quality Engineering in Production Systems*, Nova Iorque: McGraw-Hill, 1989.

- [28] B. Ye e F. Salustri, "Simultaneous Tolerance Synthesis for Manufacturing and Quality," *Research in Engineering Design*, pp. 98-106, 2003.
- [29] F. H. Speckhart, "Calculation of tolerance based on a minimum cost approach," *ASME Journal of Engineering for Industry*, pp. 447-453, 1972.
- [30] M. F. Spotts, "Allocation of tolerance to minimize cost of assembly," *ASME Journal of Engineering for Industry*, pp. 762-764, 1973.
- [31] K. C. Kapur, S. Raman e P. S. Pulat, "Methodology for tolerance design using quality loss function," *Computers and Industrial Engineering*, pp. 254-257, 1990.
- [32] H. Vasseur, T. Kurfess e J. Cagan, "Optimal tolerance allocation for improved productivity," em *Proceeding of NSF Design and Manufacturing Systems Conference*, Charlotte, 1993.
- [33] M. Krishnaswami e R. W. Mayne, "Optimizing tolerance allocation for minimum cost and maximum quality," em *Proceedings of ASME Design Automation Conference, 20th Design Automation Conference*, 1994.
- [34] B. K. Ngoi e O. C. Teck, "A tolerancing optimisation method for product design," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 290-299, 1997.
- [35] M. N. Islam, "A Practical Approach to Tolerance Allocation," *International Review of Mechanical Engineering* 2 (4), pp. 614-623, 2008.
- [36] Y.-C. Lee e C.-C. Wei, "Process Capability-Based Tolerance Design to Minimise Manufacturing Loss," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 33-37, 1998.
- [37] A. Jeang, "Computer-aided tolerance synthesis with statistical method and optimization techniques," *Quality and Reliability Engineering International*, v.17, pp. 131-139, 2001.
- [38] P. Panichkun, Optimizing tolerance allocation for normally distributed dimensions including process capability constraints, Ann Arbor: UMI Microform, 2001.
- [39] P. N. Koch, R.-J. Yang e L. Gu, "Design for six sigma through robust optimization," *Struct Multidisc Optim*, v.26, pp. 235-248, 2004.
- [40] Y.-l. Cao, J.-x. Yang, Z.-t. Wu e L.-q. Wu, "A robust tolerance design method based on process capability," *Journal of Zhejiang University SCIENCE* v.5, n.1, pp. 81-85, 2004.
- [41] M.-Y. Liao, "Economic tolerance design for folded normal data," *International Journal of Production Research*, pp. 4123-4137, 2010.
- [42] A. Bargelis, "Design for process capability and capacity at the product conception stage,"

- em *19th International Conference on Production Research*, Valparaíso Pontifical Catholic University of Valparaíso, 2007.
- [43] C. Hernández e R. Tutsch, “Statistical Dynamic Specifications Method for Allocating Tolerances,” em *12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 2013.
 - [44] A. Mourão, Dimensionamento Funcional e Tecnológico, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa: Apontamentos da disciplina de Toleranciamento de Sistemas Mecânicos do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da FCT/UNL, 2004.
 - [45] S. A. Altarazi, *Operational Tolerance Allocation and Machine Assignment under Process Capability and Product Cycle Constraints*, Amman: Dissertação de doutoramento não publicada, College of Engineering and the faculty of the Graduate School of Wichita State University, 2005.
 - [46] O. Bjorke, *Computer-Aided Tolerancing*, Nova Iorque: ASME Press, 1989.
 - [47] Z. Wu, W. H. ElMaraghy e H. A. ElMaraghy, “Evaluation of cost-tolerance algorithms for desing tolerance analysis and synthesis,” *Manufacturing Review*, pp. 168-179, 1988.
 - [48] K. W. Chase, “Tolerance Allocation Methods for Designers,” *ADCATS Report*, vol. 99, n.º 6, 1999.
 - [49] P. Drake, “Traditional Approaches to Analyzing Mechanical Tolerance Stacks,” em *Dimensioning and Tolerancing Handbook*, Nova Iorque, McGraw-Hill, 1999, pp. (9-1)-(9-39).
 - [50] K. W. Chase e W. H. Greenwood, “Design issues in mechanical tolerance analysis,” *Manufacturin Review, AMSE*, vol. 1, n.º 1, pp. 50-59, 1988.
 - [51] P. Singh, P. Jain e S. Jain, “Important issues in tolerance design of mechanical assemblies. Part 2: tolerance synthesis,” *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 223(10), pp. 1249-1287, 2009.
 - [52] H.-G. R. Choi, M. Park e E. Salisbury, “Optimal tolerance allocation with loss functions,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, v.122, pp. 529-535, 2000.
 - [53] E. Umaras, *Tolerâncias Dimensionais em Conjuntos Mecânicos: Estudo e Proposta para Otimização*, São Paulo: Dissertação de mestrado não publicada, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.
 - [54] N. Suh, *The Principles of Design*, Nova Iorque: Oxford University Press, 1990.

- [55] N. P. Suh, *Axiomatic Design: Advances and Applications*, Nova Iorque: Oxford University Press, 2001.
- [56] A. Gonçalves-Coelho, "Axiomatic Design and the Concurrent Engineering Paradigm," em *Computing and Solutions in Manufacturing Engineering*, Brasov - Roménia, 2004.
- [57] A. Mourão, J. Fradinho e A. M. Gonçalves-Coelho, "Solving Coupled Supply Chain Problems with Axiomatic Design and Mechanical Tolerances Design," *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, Vol. III, No. 2, pp. 79-84, 2011.
- [58] A. Mourão, G. Nestian, L. Slatineanu e A. M. Gonçalves-Coelho, "Selection of Non-Conventional Machining Systems Based on the Axiomatic Design Theory," *Nonconventional Technologies Review -no.4*, pp. 50-55, 2007.
- [59] M. C. Santos, *Uma Abordagem Axiomática ao Projecto de Sistemas de Climatização*, Dissertação de doutoramento não publicada, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa, 2010.
- [60] E. M. Benavides, *Advanced engineering design - An integrated approach*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2012.
- [61] A. M. Gonçalves-Coelho, "O Projecto de Engenharia - Uma Perspectiva Axiomática," em *Seminário de Ciências de Engenharia e Desenvolvimento Tecnológico*, Monte de Caparica, 1994.
- [62] B. S. El-Haik, *Axiomatic Quality*, Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2005.
- [63] ISO - International Organization for Standardization, "ISO 286-1:2010 Geometrical product specifications (GPS) -- ISO code system for tolerances on linear sizes -- Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits".

Anexo A Noções sobre estatística

Neste anexo apresentam-se algumas noções sobre estatística, que se consideram importantes como complemento aos conteúdos apresentados no corpo da dissertação.

Conceitos básicos sobre estatística

Média e variância

Para uma variável aleatória quantitativa contínua X , com valores x_1, x_2, \dots, x_n , com função densidade de probabilidade $f(x)$, a média ou valor médio de X , denotado como μ ou $E(X)$, é [1]

$$\mu_X = E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx \quad (\text{A.1})$$

A variância de X , denotada como $V(X)$ ou σ^2 , é

$$\sigma^2 = V(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx - \mu^2 \quad (\text{A.2})$$

O desvio padrão (σ) de X é obtido através de:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (\text{A.3})$$

onde:

n é o tamanho da população

x_i é o valor do i -ésimo componente da população

Histogramas

A mera observação dos dados recolhidos referentes a uma dada característica da qualidade não é em si suficiente para extrair conclusões sobre a dispersão ou sobre o valor em torno do qual os dados se encontram centrados [1]. Um histograma é um gráfico de barras que proporciona uma aproximação a uma função densidade de probabilidade, e que ao ilustrar a frequência de ocorrência dos valores de uma variável contínua, fornece informações importantes sobre a dispersão e localização dos dados recolhidos.

O histograma, em conjunto com a média \bar{x} e o desvio padrão s da amostra, revela-se uma fonte de informação sobre a capacidade do processo de grande importância. Para que seja possível obter uma estimativa razoável da capacidade do processo deve-se utilizar um número de observações igual ou superior a 100, para garantir que o histograma é relativamente estável [1].

Algumas distribuições contínuas importantes

Nesta secção abordam-se algumas distribuições contínuas importantes no controlo estatístico dos processos e na síntese de tolerâncias.

Distribuição rectangular ou uniforme

Uma distribuição rectangular ou uniforme apresenta uma probabilidade constante num intervalo específico. Na Figura A.1 mostra-se a função densidade de probabilidade de uma variável aleatória contínua uniforme.

Uma variável aleatória contínua X com função densidade de probabilidade

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \quad a \leq x \leq b \quad (\text{A.4})$$

é uma variável aleatória uniforme contínua.

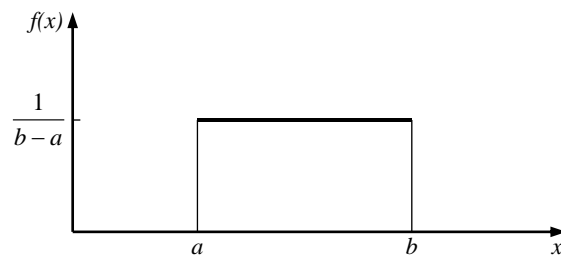


Figura A.1 - Função densidade de probabilidade contínua uniforme.

Se X é uma variável aleatória contínua uniforme ao longo de $a \leq x \leq b$, o valor médio (μ) e a variância (σ^2) de X são

$$\mu = E(X) = \frac{(a+b)}{2} \quad (\text{A.5})$$

$$\sigma^2 = V(X) = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (\text{A.6})$$

A função de distribuição acumulada $F(x)$ de uma variável aleatória contínua uniforme obtém-se por integração. Se $a < x < b$

$$F(x) = \int_a^x \frac{1}{b-a} du = \frac{x-a}{b-a} \quad (\text{A.7})$$

A descrição completa da função de distribuição acumulada de uma variável aleatória contínua uniforme é

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x < b \\ 1, & b \leq x \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

Distribuição Normal ou Gaussiana

A distribuição Normal é possivelmente a distribuição mais importante na teoria e na prática estatística.

Uma variável X aleatória com função densidade acumulada dada pela equação (A.9).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad -\infty < x < +\infty \quad (\text{A.9})$$

é uma variável aleatória Normal com parâmetros μ onde $-\infty < \mu < +\infty$, e $\sigma > 0$. O valor de $E(X) = \mu$ determina o centro da função densidade acumulada, e o valor de $V(X) = \sigma^2$ determina a largura.

Utiliza-se habitualmente a notação $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ para designar uma variável que segue uma distribuição Gaussiana ou Normal com média μ e variância σ^2 (ver Figura A.2 –)

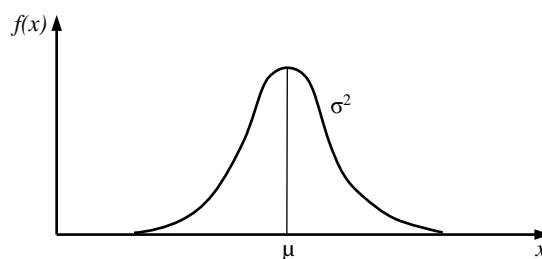


Figura A.2 – Função de densidade de probabilidade Normal.

A Função de Distribuição, que dá a probabilidade da variável X tomar um valor igual ou inferior a a , é definida por

$$P(X \leq a) = F(a) = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (\text{A.10})$$

A distribuição Normal usufrui de algumas propriedades importantes. Uma delas refere-se à relação existente entre o desvio padrão e a área sob a curva Normal. Para qualquer variável aleatória Normal,

- $P(\mu - \sigma < X < \mu + \sigma) = 0,6826$
- $P(\mu - 2\sigma < X < \mu + 2\sigma) = 0,9545$
- $P(\mu - 3\sigma < X < \mu + 3\sigma) = 0,9973$
- $P(X < \mu) = P(X > \mu) = 0,5$

Na maioria dos problemas de gestão da qualidade assume-se que a distribuição dos dados é Normal. No entanto, é conveniente verificar se tal hipótese é plausível. Existem vários métodos práticos, porém subjectivos, para verificar a Normalidade dos dados. É, contudo, aconselhável utilizar, sempre que possível, testes estatísticos objectivos. Dois dos testes com maior utilização na área da qualidade quando se pretende verificar a Normalidade dos dados são o teste do χ^2 e o teste de Kolmogorov-Smirnov [1].

Distribuição Normal padronizada

Uma variável aleatória Normal de valor médio nulo ($\mu = 0$) e variância unitária ($\sigma^2 = 1$) denomina-se uma variável aleatória Normal padronizada e é indicada como Z . A função de probabilidade acumulada de uma variável aleatória Normal padronizada é denotada como

$$\Phi(z) = P(Z \leq z) \quad (\text{A.11})$$

A utilização desta distribuição facilita a aplicação da distribuição Normal, através do uso de valores tabelados da distribuição Normal padronizada. Se X é uma variável aleatória Normal com $E(X) = \mu$ e $V(X) = \sigma^2$, a variável aleatória

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (\text{A.12})$$

é uma variável aleatória Normal com $E(Z) = 0$ e $V(Z) = 1$, ou seja, Z é uma variável aleatória Normal padronizada. A este processo de conversão de uma variável aleatória $N(\mu, \sigma^2)$ numa variável aleatória $N(0,1)$ chama-se padronização da variável aleatória Normal e, é de grande utilidade no cálculo de probabilidades.

Suponha-se que X é uma variável aleatória Normal com média μ e variância σ^2 . Então

$$P(X \leq x) = P\left(\frac{X - \mu}{\sigma} \leq \frac{x - \mu}{\sigma}\right) = P(Z \leq z) \quad (\text{A.13})$$

onde Z é a variável aleatória Normal padronizada, e $z = \frac{x - \mu}{\sigma}$ é o valor de z obtido pela padronização de X . A probabilidade é obtida através de tabelas recorrendo ao valor de z .

Anexo B Modelos estatísticos de processos

Uma avaliação abrangente e correcta do processo deve ter por base um modelo, obtido através de métodos estatísticos, que descreva com precisão a produção. A importância da informação resultante da avaliação dos processos depende da forma como a modelação se aproxima da realidade. A utilização de métodos estatísticos permite obter um modelo matemático a partir destes dados [1].

A experiência tem mostrado que os processos da vida real podem ser aproximados por três modelos diferentes, dependendo do tipo de processo [4]:

- Modelo de processo A (Figura B.1),
- Modelo de processo B (Figura B.3),
- Modelo de processo C (Figura B.4).

Os modelos de processo apresentados a seguir são integralmente baseados no livro: *'Guidelines for the evaluation of measurement systems and processes, for acceptance of production facilities: with original guidelines from Ford, General Motors and Daimler-Benz'* [4].

Modelo de processo A

Este modelo de processo caracteriza-se por:

- A distribuição dos valores medidos num instante de tempo " t " é uma distribuição Normal com desvio padrão $\sigma(t)$ e média $\mu(t)$.
- O desvio padrão do processo $\sigma(t)$ é constante.
- A média do processo $\mu(t)$ é constante.

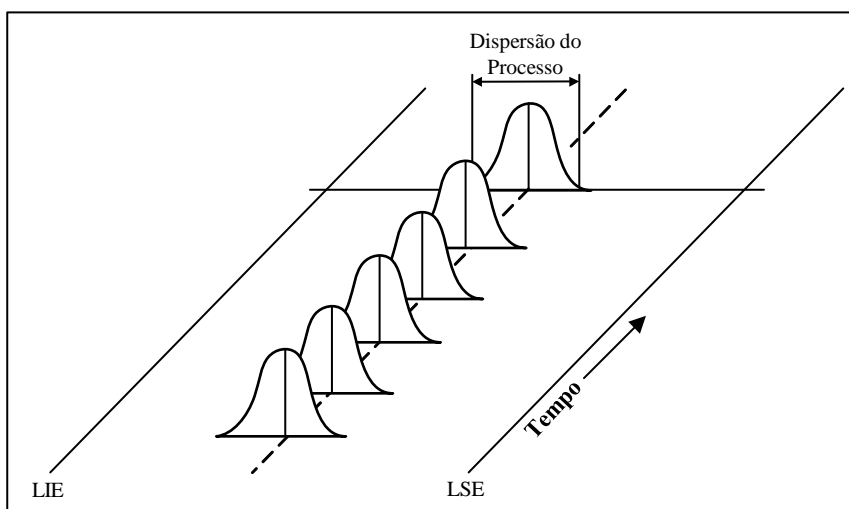


Figura B.1 – Modelo de processo A.

Este modelo é utilizado em processos nos quais o desvio padrão total é idêntico à dispersão instantânea do processo ($\sigma_{total} = \hat{\sigma}$), e por isso representa um cenário ideal que é raro na prática.

Modelo de processo A1

Algumas características como as de forma, as posicionais ou características com apenas um limite natural, tendem a seguir uma distribuição diferente da Normal. Nestes casos, o modelo de processo A1 pode ser utilizado como uma base para a análise do processo.

O modelo A1 caracteriza-se por:

- A distribuição instantânea dos valores medidos no instante “t” não corresponde a nenhuma distribuição Normal.
- A localização, dispersão, assimetria e achatamento são constantes no decorrer do tempo.

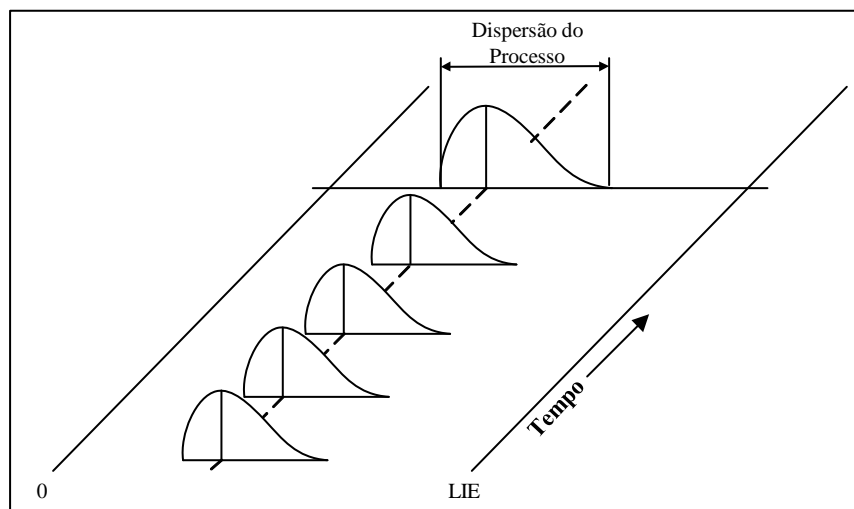


Figura B.2 – Modelo de processo A1.

Modelo de processo B

O modelo de processo B caracteriza-se por:

- A distribuição dos valores medidos num instante de tempo “t” é uma distribuição Normal com desvio padrão $\sigma(t)$ e média $\mu(t)$.
- O desvio padrão do processo $\sigma(t)$ é constante.
- A média do processo $\mu(t)$ é Normalmente distribuída em torno de uma média constante a longo-prazo.
- Se se considerar toda a população dos valores medidos, o processo segue uma distribuição Normal.

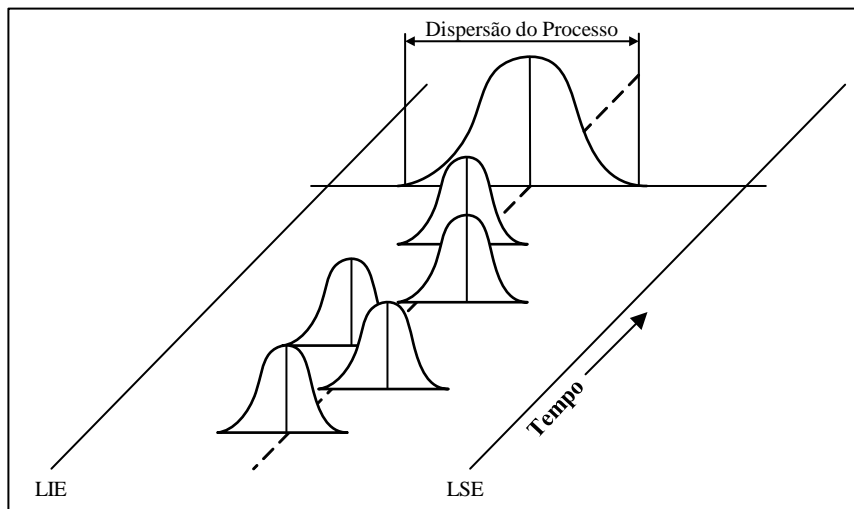


Figura B.3 – Modelo de processo B.

Modelo de processo C

O modelo de processo C caracteriza-se por:

- A distribuição dos valores medidos num instante de tempo “t” é uma distribuição Normal com desvio padrão $\sigma(t)$ e média $\mu(t)$.
- O desvio padrão do processo $\sigma(t)$ é constante.
- A média do processo $\mu(t)$ está sujeita a alterações que seguem um padrão conhecido.

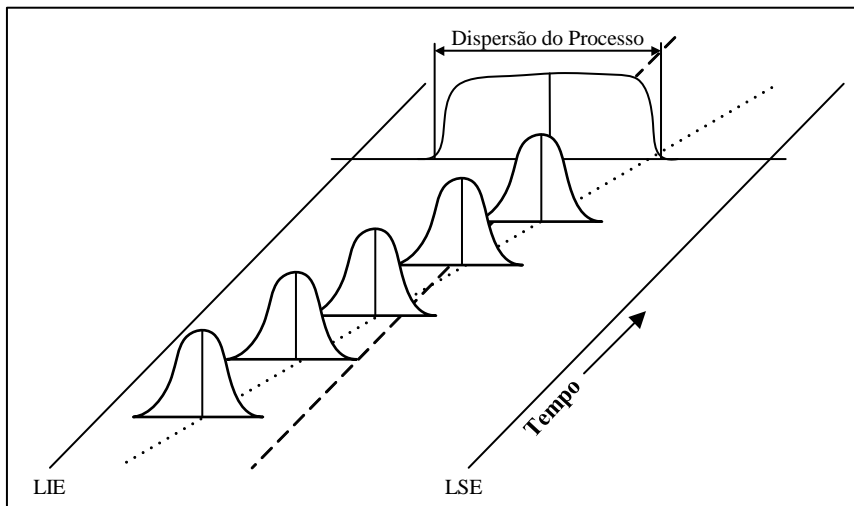


Figura B.4 – Modelo de processo C.

Este modelo é de aplicação comum em processos afectados pelo desgaste da ferramenta.

Na prática, verifica-se com frequência que o comportamento dos processos não corresponde ao comportamento idealizado apresentado nos modelos anteriores pois existem casos mistos, para os quais, a qualidade do ajuste do modelo pode ser avaliada por meios gráficos [4]. Estes casos não serão alvo de estudo, pois afastam-se do âmbito desta dissertação.

Anexo C Código da aplicação em linguagem Matlab®

Este anexo contém o código do programa em linguagem Matlab® que permite obter o conjunto de tolerâncias que nivelam as capacidades dos processos, maximizam o nível sigma e minimizam o conteúdo de informação, de acordo com o método proposto na secção §5.4 e com o fluxograma apresentado na secção §5.5.

Antes de executar a aplicação, o utilizador deve assegurar-se que criou o ficheiro *optimizacao.xls* no mesmo directório onde se encontra o ficheiro da aplicação.

```
clc
close all

% Especificações iniciais de projecto [em mm] %
Tconj = 0.080;
A = 65;          tA = 0.046;
B = 24.5;        tB = 0.033;
C = 90;          tC = 0.054;

% Dados do controlo da qualidade [em mm] %
% mean = valor médio do processo %
% stdev = desvio padrão do processo %
lote = 5000;
mean1 = 65.000; stdev1 = 0.0055;
mean2 = 24.500; stdev2 = 0.0034;
mean3 = 90.000; stdev3 = 0.0050;

% Estudo inicial das capacidades %
A1 = normrnd(mean1, stdev1, lote, 1);
A2 = capability(A1, [A-tA/2 A+tA/2]);
B1 = normrnd(mean2, stdev2, lote, 1);
B2 = capability(B1, [B-tB/2 B+tB/2]);
C1 = normrnd(mean3, stdev3, lote, 1);
C2 = capability(C1, [C-tC/2 C+tC/2]);

% Variáveis %
Cp1=A2.Cp;      Cpk1 = A2.Cpk;      p1 = A2.Pl + A2.Pu;
Cp2=B2.Cp;      Cpk2 = B2.Cpk;      p2 = B2.Pl + B2.Pu;
Cp3=C2.Cp;      Cpk3 = C2.Cpk;      p3 = C2.Pl + C2.Pu;
p = 1 - (1 - p1)*(1 - p2)*(1 - p3);
DPMO = p * 10^6;
```

```

Sigma = norminv(1 - p) + 1.5;
IC1 = log2(1/(1-p1));
IC2 = log2(1/(1-p2));
IC3 = log2(1/(1-p3));
IC = IC1 + IC2 + IC3;

%Resultados do estudo inicial das capacidades%
disp('Resultados do estudo inicial das capacidades')
Componentes = {'Componentes','1','2','3','Conjunto'};
Cp = {'Cp', Cp1, Cp2, Cp3, ''};
Cpk = {'Cpk', Cpk1, Cpk2, Cpk3, ''};
Proba = {'Probabnconfor', p1, p2, p3, p};
NSigma = {'Nivel Sigma', '', '', '', Sigma};
IC = {'IC', IC1, IC2, IC3, IC};
table = [Componentes, Cp, Cpk, Proba, NSigma, IC]

%Rotina de pesquisa das tolerancias que maximizam o nivel sigma e minimizam o IC%
if roundn(Cp1,-1)~=roundn(Cp2,-1)~=roundn(Cp3,-1)
    tA0 = roundn(0.040+(0.060-0.040).*rand(1,1),-3);
    tB0 = roundn(0.025+(0.040-0.025).*rand(1,1),-3);
    tC0 = roundn(0.040+(0.070-0.040).*rand(1,1),-3);
    for i=1:10000
        tA0 = roundn(0.040+(0.060-0.040).*rand(1,1),-3);
        tB0 = roundn(0.025+(0.040-0.025).*rand(1,1),-3);
        tC0 = roundn(0.040+(0.070-0.040).*rand(1,1),-3);
        A2f = capability(A1,[A-(tA0)/2 A+(tA0)/2]);
        B2f = capability(B1,[B-(tB0)/2 B+(tB0)/2]);
        C2f = capability(C1,[C-(tC0)/2 C+(tC0)/2]);
        Cp1f=A2f.Cp; Cpk1f = A2f.Cpk; p1f = A2f.Pl + A2f.Pu;
        Cp2f=B2f.Cp; Cpk2f = B2f.Cpk; p2f = B2f.Pl + B2f.Pu;
        Cp3f=C2f.Cp; Cpk3f = C2f.Cpk; p3f = C2f.Pl + C2f.Pu;
        pf = 1 - (1 - p1f)*(1 - p2f)*(1 - p3f); % Probabilidade total
        DPMOf = pf * 10^6; % Defects per million opportunities (DPMO)
        Sigmaf = norminv(1 - pf) + 1.5; % Sigma Level
        IC1f = log2(1/(1-p1f));
        IC2f = log2(1/(1-p2f));
        IC3f = log2(1/(1-p3f));
        ICf = IC1f + IC2f + IC3f;
        Componentes = {'Componentes','1','2','3','Conjunto'}; % Tabela
        Tolerancias = {'tolerancias', tA0, tB0, tC0, ''};
        Capacidade1 = {'Cp',Cp1f, Cp2f, Cp3f, ''};
        Capacidade2 = {'Cpk',Cpk1f, Cpk2f, Cpk3f, ''};
        Probabilidade = {'Probabnconfor', p1f, p2f, p3f, pf};
        Conteudo = {'ConteudoInf',IC1f, IC2f, IC3f, ICf};
        NivelSigma = {'Nivel Sigma', '', '', '', Sigmaf};
    end
end

```

```

if sqrt((tA0)^2+(tB0)^2+(tC0)^2)<=Tconj;
    if (Sigmaf > 6.15);
        if (ICf < 3.0*10^(-6));
            Solucao=[Componentes', Tolerancias', Capacidade1', Capacidade2',
                Probabilidade', NivelSigma', Conteudo']
        end
    end
end
end
else
    disp('Nao é necessário alterar as tolerâncias')
end

% Guarda os resultados obtidos no ficheiro optimizacao.xls
xlswrite('optimizacao.xls','SituacaoInicial','Situacao Inicial','A1');
xlswrite('optimizacao.xls','Solucao','Solucao Possivel','A1');

```